

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

Enrique Peña González¹, Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache², Luis Pena Mosquera³, Jerónimo Puertas Agudo⁴

Resumen:

La aplicación de tecnologías láser en la Hidráulica experimental es un campo de aparición relativamente reciente pero con un desarrollo prometedor. En el ámbito del transporte de sedimentos estas tecnologías pueden ser utilizadas, por ejemplo, para describir la evolución de la cota de un lecho de sedimentos. En este artículo se presenta la aplicación de un escáner láser tridimensional, 3D-Scanner, que mide dicha cota a través de la intersección de un haz láser con la superficie del fondo, corrigiendo el efecto de la refracción en la línea media del haz. Los resultados obtenidos con esta herramienta experimental han sido comparados con los aportados por un velocímetro de partículas PIV en el registro del perfil longitudinal del lecho. De esta forma, se demostrará su utilización en estudios hidráulicos con transporte de sedimentos para registrar la evolución del fondo con una precisión muy alta, de forma continua y no intrusiva en el medio.

Palabras clave: Instrumentación, láser, calibración, diseño experimental, medida de perfiles, transporte de sedimentos, hidráulica fluvial, ensayos de laboratorio, movimiento de sedimentos por el fondo.

INTRODUCCIÓN

El estudio de los procesos asociados al transporte de sedimentos es uno de los campos más complejos de la Hidráulica. La falta de resultados analíticos y la dificultad de presentar modelos numéricos de aceptación universal reflejan la necesidad de avanzar en el ámbito experimental. En este sentido, la aparición de las tecnologías láser ha contribuido a desarrollar herramientas que pueden aportar resultados prometedores.

La aplicación de dichas tecnologías en el dominio hidráulico, especialmente con los conocidos velocímetros de partículas (PIV, Particle Image Velocimetry), supone un avance muy relevante en la obtención de campos de velocidades en tiempo real, régimen no permanente, y de forma no intrusiva en el medio (Adrian (1996), Grant (1997),

Raffel *et al* (2000)). Aunque en el registro de parámetros relacionados con el transporte de sedimentos también existen avances significativos, los resultados no son tan universales como en el análisis hidrodinámico (Puertas *et al*, 2002).

En este artículo se presenta la aplicación de un escáner tridimensional que permite restituir la superficie de un lecho de sedimentos en tiempo real, con un alto grado de precisión y de forma no intrusiva en el medio. En la primera parte del texto se analiza esta herramienta experimental, denominada 3D-Scanner, detallando su funcionamiento y características fundamentales (McCallum *et al*, 1998a y 1998b). El aparato empleado en nuestro caso, denominado comercialmente Polhemus FastScan (Polhemus, 1998), realiza un barrido de la superficie de un objeto con luz láser, cuya imagen es recogida en dos cámaras para su restitución.

¹Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado. Escuela TS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad de A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15192 A Coruña, España. E-mail: epena@udc.es. Teléfono: (34) 981.16.70.00. Fax: (34) 981.16.71.70

²Ingeniero Industrial. Ingeniero de Sistemas del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) - Universidad de A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15192 A Coruña, España. E-mail: citeec5@udc.es.

³Dr. Ingeniero Agrónomo. Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) - Universidad de A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15192 A Coruña, España. E-mail: citeec7@udc.es.

⁴Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Catedrático de Universidad. Escuela TS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos - Universidad de A Coruña. E-mail: jpuertas@udc.es.

Artículo recibido el 7 de junio de 2004, recibido en forma revisada el 29 de octubre de 2004 y aceptado para su publicación el 3 de noviembre de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

En la segunda parte del texto se analizan los fundamentos físicos y del sistema de medida, y a continuación se presentan las dos baterías de ensayos realizadas para evaluar la fiabilidad y aplicabilidad de este instrumento en los procesos con transporte de sedimentos. Las primeras pruebas realizadas en un canal hidráulico reflejaron la lógica influencia de la refracción del agua en los resultados. Corrigiendo dicho efecto se demostrará la validez del 3D-Scanner en el registro de la superficie de un lecho de sedimentos y su evolución, con una resolución inferior al milímetro. Por último, se presenta la comparación realizada, en un ensayo con transporte de sedimentos, de la medición del fondo con un velocímetro de partículas PIV.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento en el que se basa este escáner es, en realidad, el mismo que tenemos para nuestra visión. La intersección del plano de luz láser con el objeto analizado produce como resultado una línea. El ángulo bajo el que una cámara observa esta línea se traduce en su posición en el espacio. Uno de los aspectos más destacados de esta técnica en su aplicación al campo hidráulico es su naturaleza no intrusiva.

Equipo y ubicación en el laboratorio

El equipo utilizado en esta investigación consta de un soporte que contiene el emisor láser y dos cámaras, un elemento de referencia de la posición en el espacio, y un posicionador automático para su traslación en un eje. El sistema digitaliza así superficies sólidas opacas a través de tecnologías láser e imagen digital, recuperando la forma de un objeto incluso aunque el mismo esté en movimiento.

El software utilizado permite realizar los cálculos necesarios para obtener la superficie del objeto, a partir de las imágenes de las cámaras. El contorno es exportado como una nube de puntos en el espacio y una serie de caras triangulares con vértices en dichos puntos. En el programa puede seleccionarse la resolución y el tamaño de los triángulos, buscando un compromiso entre la máxima precisión posible y el coste computacional de la generación de dicha malla. En las figuras 1 y 2 pueden contemplarse el equipo y su colocación en el canal de ensayos del Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Universidad de A Coruña).

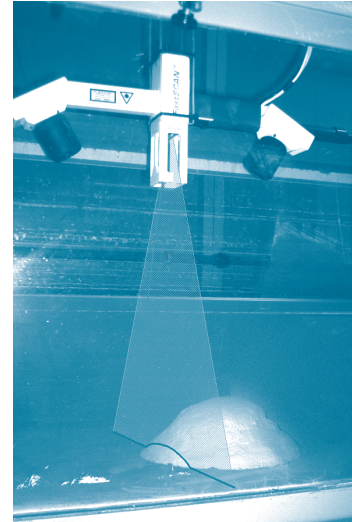


Figura 1. Haz láser emitido por el 3D-Scanner

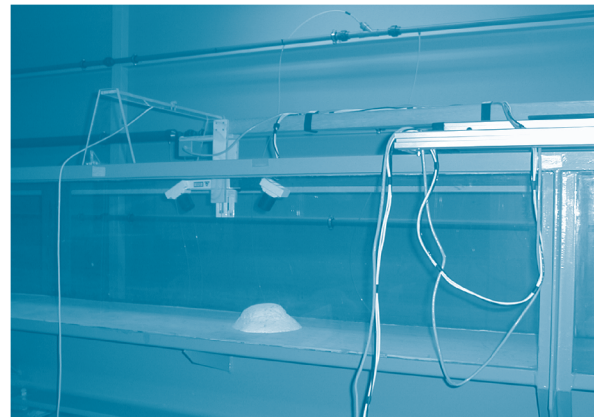


Figura 2. Equipo, posicionador y brazo soporte

Fundamentos físicos

El proceso de digitalización de superficies del 3D-Scanner es del tipo descrito como técnicas activas de imagen, y consta de dos fases básicas. En la primera, de adquisición, el usuario desplaza el haz láser sobre el objeto y el sistema obtiene información del mismo en forma de coordenadas de puntos. En la segunda, de reconstrucción, el sistema interpreta las nubes de puntos transformándolas en superficies. El objetivo de este artículo no es el estudio de los algoritmos de adquisición y reconstrucción, sino la aplicación del equipo para digitalizar objetos bajo una lámina de agua.

En esta primera parte se analiza el uso convencional del equipo, realizando mediciones sin dicha lámina entre el 3D-Scanner y la superficie a digitalizar. En la toma de imágenes, la línea de intersección entre el plano que forma el haz láser y la superficie del objeto es observada bajo un determinado ángulo por las dos cámaras, que calculan la posición de los puntos de dicha línea.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

De la información redundante de las dos imágenes se obtiene la posición relativa de la línea respecto al mando del haz. La figura 3 muestra el esquema de funcionamiento, el cual queda representado analíticamente por las ecuaciones (1) y (2), donde O es el centro óptico de la lente y M es el punto de la superficie cuyas coordenadas se pretende medir.

Las alturas z se determinan a partir del ángulo θ , bajo el cual la cámara observa el haz láser proyectado, y la distancia c entre el centro óptico de la lente de la cámara y el haz láser. El centro óptico de una lente es el punto de la misma en el cual la luz no experimenta ninguna desviación. Cuando la lente presenta dos superficies idénticas, el centro óptico coincide con el centro geométrico de la lente. Este ángulo puede determinarse a partir de otros dos, denominados α y β . El primero de ellos es una constante geométrica del propio equipo de medición, y el segundo se obtiene en el plano de la imagen formada en la cámara, en función de la distancia focal de la lente. Así, conocida la distancia c antes indicada, para el plano xz pueden escribirse las siguientes expresiones:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \quad (1)$$

$$z = \frac{c}{\tan \theta} \quad (2)$$

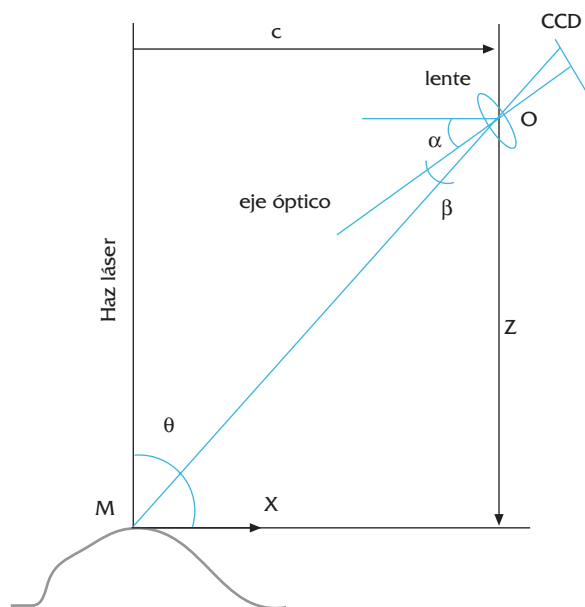


Figura 3. Haz láser, objeto y variables involucradas

Estas coordenadas de los puntos en la fase de adquisición son calculadas en unos ejes (x,y,z)

relativos al mando del haz láser. Las coordenadas absolutas (X,Y,Z) se obtienen a través de la posición en el espacio de este mando, que es determinada mediante la emisión de tres campos electromagnéticos perpendiculares por parte de un objeto fijo. Estos campos llegan a un receptor situado en dicho mando dotado con tres bobinas perpendiculares. El análisis de dichos campos permite obtener la posición absoluta del mando en el espacio y su orientación, de forma que, junto con la información de la posición relativa de los puntos respecto al mismo, se determina la posición absoluta de los puntos de la línea iluminada por el haz láser.

La aplicación de esta tecnología láser en la digitalización de un fondo de sedimentos bajo una lámina de agua debe tener en cuenta el efecto de la refracción en las medidas realizadas, ya que el haz incidente es desviado al cambiar de medio. Según la ley de Snell:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2) \quad (3)$$

donde (n_1, n_2) son los índices de refracción de ambos medios, y (θ_1, θ_2) son los ángulos de incidencia y de refracción.

El índice de refracción de la luz depende no sólo del medio al que cambia sino de su color, de modo que diferentes longitudes de onda sufren distintos cambios de dirección. El hecho de trabajar con luz láser monocromática hace que no sea necesario considerar esta fuente de error. Algunos instrumentos similares trabajan con luz policroma, y la precisión en la toma de imágenes bajo una lámina de agua se ve comprometida. Una ventaja adicional de la luz láser con relación a otras fuentes de luz es la elevada direccionalidad o colimación del haz, que permite que su proyección sobre los objetos sea una línea muy delgada.

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL 3D-SCANNER

En este apartado se presenta el análisis teórico y la metodología experimental que se ha seguido para determinar la aplicación del 3D-Scanner en estudios hidráulicos con transporte de sedimentos.

Metodología experimental

Los ensayos realizados fueron desarrollados en el Laboratorio de Hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña.

Este laboratorio está dotado con un circuito hidráulico con un caudal máximo de $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$, y un canal rectangular de sección 0.5×0.5 metros, y 15 metros de longitud. La pendiente del canal es variable entre 2.5% y (-0.5)%, con una compuerta en su parte final que permite variar la cota de vertido. Los valores del caudal, pendiente y altura de la compuerta son modificados desde un ordenador que centraliza la información.



Figura 4. Canal de ensayos

Un aspecto fundamental del canal lo constituye la naturaleza metálica de algunos elementos, lo que produjo algunos problemas en los ensayos previos de calibración. Como se comentó anteriormente, el 3D-Scanner realiza las mediciones a través del haz láser emitido, y la determinación en el espacio de la posición del mando mediante campos electromagnéticos. De esta forma, dichas mediciones pueden verse alteradas por la existencia de otros campos o materiales magnéticos en las cercanías (Nixon, 1998).

La solución para obtener la máxima resolución con este instrumento se planteó, en primer lugar, elevando el receptor o elemento de referencia mediante un soporte de metacrilato, para evitar su cercanía a los laterales metálicos del canal. En este soporte se ubicó un clinómetro para garantizar que la dirección de referencia respecto al receptor del mando fuera paralela al fondo del canal. El ángulo y el alejamiento óptimos entre mando y receptor se reflejan obteniendo una imagen plana y horizontal de la superficie, con medidas que tengan una componente de ruido o error inferior a la precisión del equipo, especificada por el fabricante en 0.5 milímetros.

Por otro lado, el brazo soporte del 3D-Scanner usado para hacer los barridos longitudinales del fondo, fue realizado en madera para evitar interacciones con los bordes metálicos. Una de las condiciones necesarias para controlar la refrac-

ción del haz láser al introducirse en la lámina de agua, es conocer su dirección en el momento de registrar la imagen. Para ello se mantuvo la posición perpendicular de dicho haz respecto al fondo del canal, desplazándolo de forma paralela a su eje con un posicionador automático, tal y como se mostró en la figura 2.

Un aspecto importante en la realización de los ensayos fue la obtención de una lámina de agua con una superficie regular y estable, que permitiera una refracción controlada. Para ello se dispuso en la entrada del canal una estructura de tranquilización que garantizara la unidimensionalidad del flujo. Otro elemento que debe ser tenido en cuenta es la existencia de impurezas en el agua, que restan precisión a las mediciones. La medida de los calados o alturas de la lámina de agua, necesarios para corregir la transformación que introduce la refracción en el haz láser, se realizó con una sonda de ultrasonidos con registro en continuo.

Ensayos con fondo plano

Los primeros ensayos fueron desarrollados para registrar los perfiles del fondo plano del canal con diferentes calados, con el objetivo de corregir el efecto de la refracción en las medidas obtenidas.

Un aspecto importante del estudio es que la refracción influye tanto en la entrada del haz láser en el agua como en las imágenes obtenidas por las cámaras, produciéndose una variación en dos planos. En el trabajo desarrollado hasta el momento se ha analizado la superficie completa del fondo, incidiendo especialmente en la línea central producida durante el barrido por la intersección del haz láser y la superficie objeto de la medición. De esta forma, si dicho haz incide de forma perpendicular a la superficie, y se estudia únicamente la línea central, no existe refracción de entrada.

Para la obtención de una relación que tuviera en cuenta la refracción se registraron medidas del calado en tiempo real con el sensor de ultrasonidos, a la vez que se realizaban los barridos con el 3D-Scanner. De esta forma pudo determinarse la relación existente entre el calado real y la profundidad del fondo virtual obtenida con la instrumentación. En la figura 5, que representa el plano vertical alineado con el eje longitudinal del canal, se introducen las variables involucradas y se esquematiza el fenómeno de la refracción.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

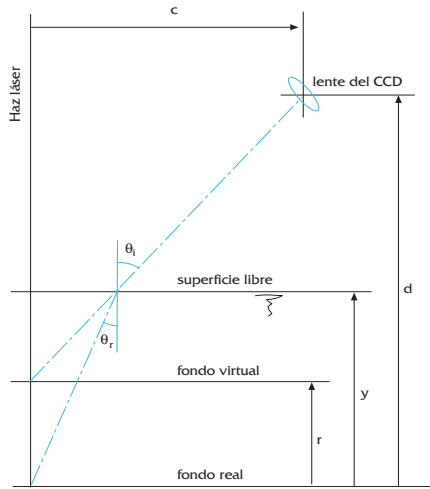


Figura 5. Influencia de la refracción con fondo plano

Bajo una lámina de agua, el ángulo θ_i bajo el cual la cámara observa la intersección del haz láser con el objeto no representa el fondo real, por lo que la ecuación (2) ya no es válida, y es necesario reformular el problema. Así, se establecen las siguientes relaciones trigonométricas para analizar la refracción del láser al atravesar la superficie de separación entre el aire (haz incidente) y el agua (haz refractado).

$$(d - y) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) + y \cdot \operatorname{tg}(\theta_r) = c \quad (4)$$

$$(d - r) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) = c \quad (5)$$

donde d es la distancia vertical entre el centro óptico de la lente y el fondo del canal, y es el calado, r es la cota virtual del fondo del canal, θ_i es el ángulo de incidencia, θ_r es el ángulo de refracción.

A partir de la ley de Snell:

$$\operatorname{sen}\theta_i = \frac{n_r}{n_i} \operatorname{sen}\theta_r \quad (6)$$

Tomando un ratio de refracción entre agua (n_r) y aire (n_i) igual a 1.333, obtenemos la siguiente expresión.

$$(d - y) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) + y \cdot \operatorname{tg}\left(\operatorname{arcsen}\left(\frac{\operatorname{sen}(\theta_i)}{1.333}\right)\right) = c \quad (7)$$

Introduciendo como datos c y d , se resuelve la ecuación anterior obteniendo para cada calado un ángulo de incidencia. De esta forma, se puede calcular la elevación virtual r en función del calado.

$$r = d - \frac{c}{\operatorname{sen}\theta_i} = d - \frac{c}{\operatorname{sen}\theta_i(y, d)} \quad (8)$$

En las figuras 6 a 8 se muestra el perfil del fondo plano registrado en los barridos realizados con diferentes calados. En el triedro dibujado el eje x representa la dirección del barrido longitudinal, mientras que el eje z representa las elevaciones. Las unidades en los tres ejes representan milímetros.

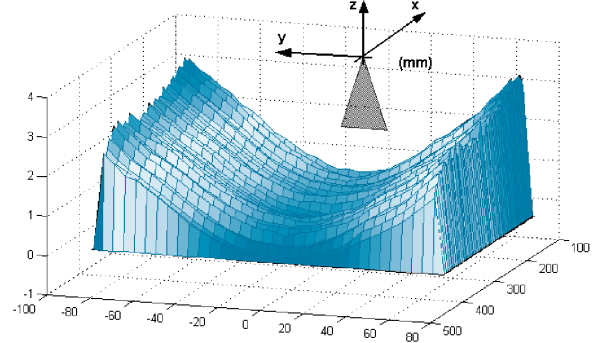


Figura 6. Perfil del fondo con un calado de 71 milímetros

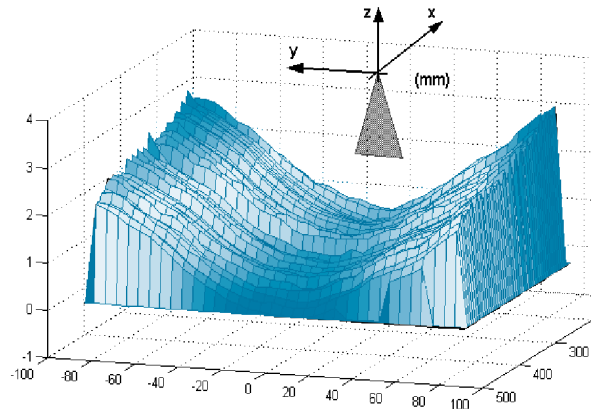


Figura 7. Perfil del fondo con un calado de 196 milímetros

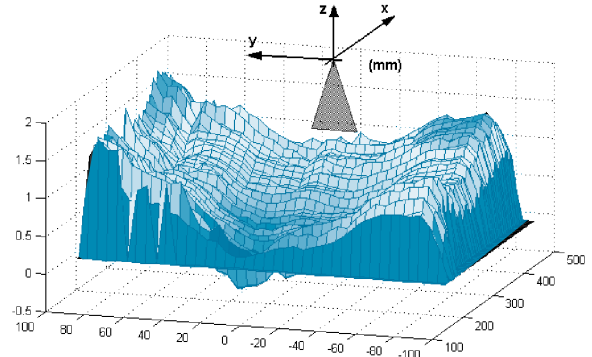


Figura 8. Perfil del fondo con un calado de 250 milímetros

El análisis de la serie de figuras anteriores permite extraer algunas conclusiones. Por un lado, la refracción del haz láser provoca que la superficie virtual observada por el equipo se curve hacia arriba en el plano de dicho haz. Además, las oscilaciones en el registro del perfil del fondo aumentan con el calado existente en cada momento.

La explicación de este fenómeno se debe a que, en ausencia de otros condicionantes, el aumento de la lámina de agua produce una influencia mayor del fenómeno de la refracción en las medidas realizadas, lo que se manifiesta en las oscilaciones que surgen con los incrementos de calado (figura 8).

Calibración de los ensayos con fondo plano

En este apartado se profundiza en el estudio de las mediciones con fondo plano, incidiendo en la influencia de la dirección del barrido en la búsqueda de un patrón de comportamiento de los resultados obtenidos.

Como puede observarse en las figuras anteriores, se percibe la existencia de una cierta pendiente en cualquiera de las secciones longitudinales del fondo estudiado, lo que puede aportar información relevante para valorar el efecto de la refracción. Centrando el análisis en la línea media del haz láser, en la figura siguiente se presentan las mediciones del fondo con distintos calados, aportando los resultados del primer barrido, y restando el valor medio del fondo obtenido con los cuatro barridos.

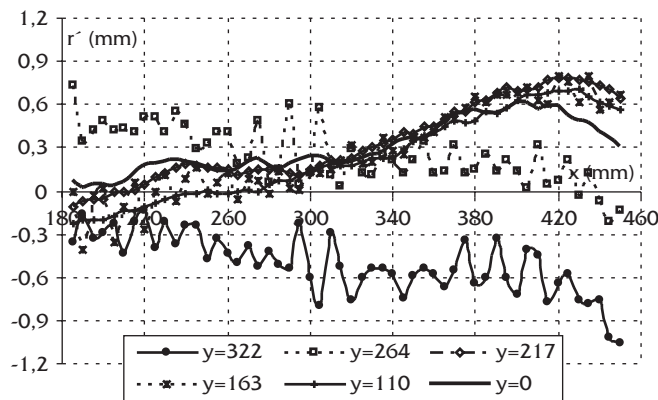


Figura 9. Desviaciones de las medidas del primer barrido respecto a la media del fondo obtenida con los cuatro barridos para cada calado

Este primer resultado muestra una gran precisión en las mediciones del perfil del fondo, obteniendo una resolución por debajo del milímetro en la mayoría de los puntos. Puede detectarse también la existencia de una cierta pendiente en todas las series, aunque el signo de la misma varía con el calado estudiado. Para analizar la influencia del sentido de la medición, se aporta a continuación una gráfica con las mediciones de los cuatro barridos con el calado mayor (322 milímetros), para el cual las mediciones reflejaron mayores desviaciones.

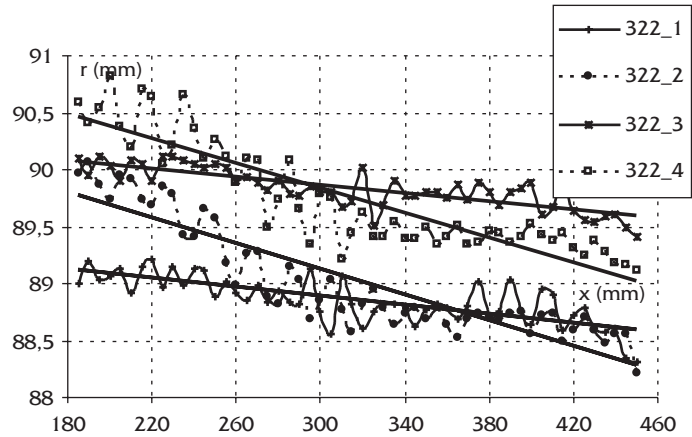


Figura 10. Perfil del fondo y rectas de regresión con los cuatro barridos (y=322 milímetros)

El análisis de la gráfica anterior, que podría extenderse al resto de calados, aporta varios elementos de interés. En primer lugar debe indicarse que los barridos 1 y 3 se realizaron en el sentido de avance del posicionador de medida, mientras que los barridos 2 y 4 siguieron el sentido contrario. Puede observarse que las mediciones presentan un error sistemático en forma de tendencia observable en las rectas de regresión, con un patrón común para los barridos en el mismo sentido.

En la figura siguiente se representan las desviaciones de cada medida respecto de la recta de regresión correspondiente a cada uno de los barridos. De esta forma se pretende conocer la precisión obtenida deshaciendo el efecto de la pendiente como error sistemático que se manifestó en las gráficas anteriores.

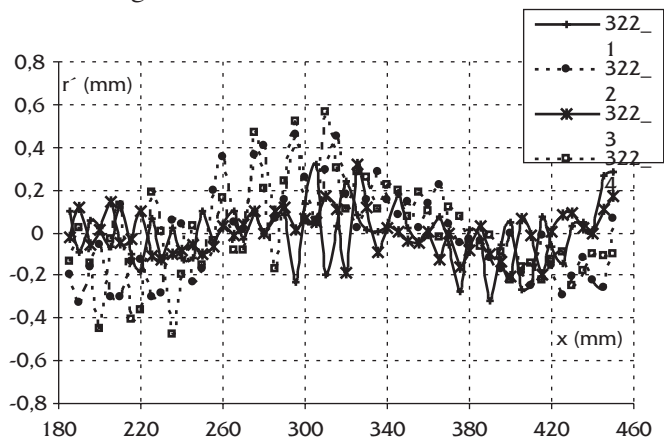


Figura 11. Desviación de las medidas del perfil del fondo respecto de la recta de regresión de cada barrido (y=322 milímetros)

Los resultados pueden considerarse muy positivos, ya que las variaciones del fondo están en casi todos los casos por debajo de los 0.3 milímetros.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

En la siguiente figura se ha extendido el análisis anterior al resto de calados analizados, obteniendo las mismas conclusiones. En ella, se han dibujado las desviaciones de las medidas obtenidas con el primer barrido de cada uno de los calados, respecto de la recta de regresión correspondiente a cada uno de ellos.

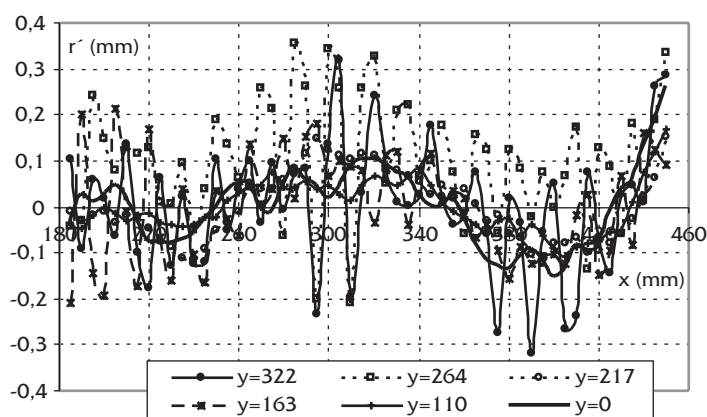


Figura 12. Desviación de las medidas del perfil del fondo respecto de la recta de regresión de cada calado con el primer barrido

De esta forma podemos enunciar que una vez corregido el efecto de la pendiente del fondo, el 3D-Scanner registró el perfil del fondo con una precisión muy alta, incluso con el calado mayor de 322 milímetros.

Finalmente, en la figura 13 se ha representado la comparación entre los resultados teóricos y experimentales de la elevación r respecto de la altura de lámina de agua y , para unos valores de $c=250$ milímetros y $d=790$ milímetros. Estos valores finales empleados en la determinación de la relación teórica, se estimaron suponiendo inicialmente que el centro óptico de la lente coincide con su centro geométrico, ya que no son aportados por el fabricante. Así, la relación teórica que se presenta fue ajustada iterando con los valores de la posición del centro óptico de la lente (c , d) y los resultados experimentales, hasta obtener los valores antes indicados.

Los datos experimentales fueron obtenidos a partir del estudio anterior, realizando la media de todos los valores registrados con los cuatro barridos del fondo, y representando el valor medio calculado para cada calado. El ajuste ofrece unos valores que entran en el rango previsto inicialmente aunque, por otro lado, este hecho no es relevante para el objetivo final del estudio, ya que la relación teórica no es utilizada durante los procesos de calibración y medición.

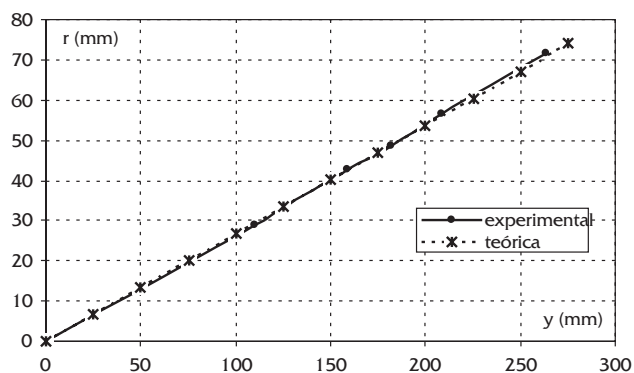


Figura 13. Comparación teórico-experimental de la elevación virtual del fondo y el calado

Como puede observarse, la tendencia de la curva en ambos casos es lineal ($r^2=0.99975$) en todo el rango de la experimentación desarrollada con el 3D-Scanner. Las conclusiones de este apartado muestran que la metodología experimental desarrollada es acertada. En primer lugar, se valida el estudio teórico de elevaciones virtuales del fondo, y, en segundo lugar, se obtienen los perfiles de dicho fondo con precisiones elevadas.

Ensayos con objeto en el fondo

Para avanzar en el estudio de la refracción y su relación con el calado, en la segunda serie de ensayos se introdujo un elemento irregular como objeto patrón, para representar el perfil del mismo con distintas alturas de la lámina de agua.

El objetivo del análisis en este caso consistió en relacionar la altura real existente con la altura virtual registrada, una vez restada la elevación virtual del fondo con los valores obtenidos en los ensayos anteriores. El esquema de la refracción y los elementos involucrados en estos ensayos son representados en la figura 14.

Las ecuaciones representativas son ahora:

$$(d - y) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) + (y - z_r) \cdot \operatorname{tg}(\theta_r) = c \quad (9)$$

$$(d - z_m) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) = c \quad (10)$$

$$z_v = z_m - r \quad (11)$$

donde z_r es la altura real, z_m la altura medida con el 3D-Scanner, z_v la altura relativa o virtual, una vez restada la elevación r del fondo del canal.

Representamos ahora la relación teórica entre las alturas virtuales respecto a las alturas reales para diferentes calados.

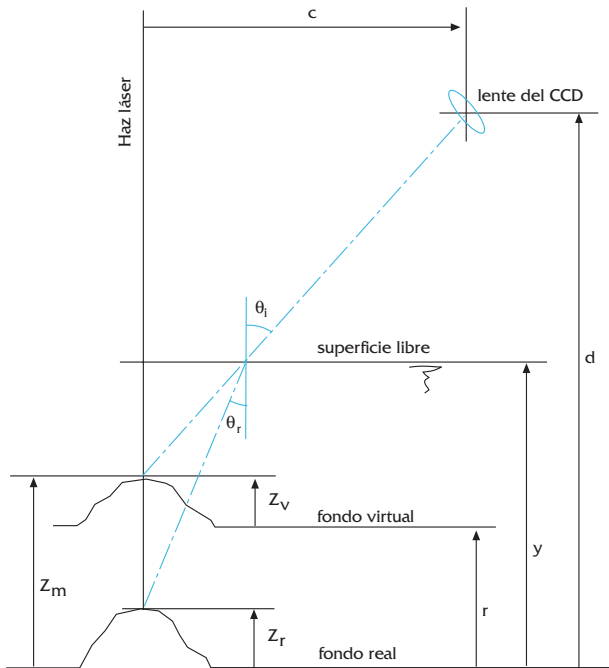


Figura 14. Influencia de la refracción con el objeto patrón

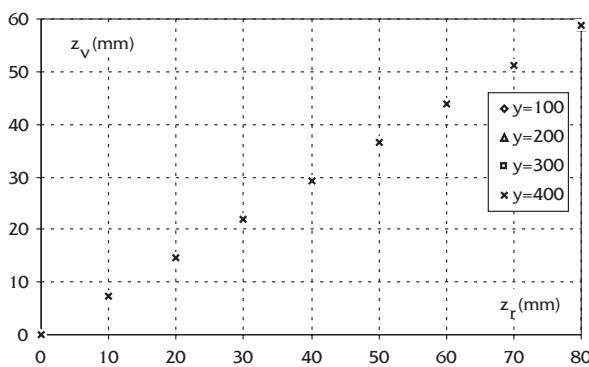


Figura 15. Relación teórica entre altura real y altura virtual, para distintos calados

Aunque en la figura 15 no se distingue fácilmente, los resultados correspondientes a los distintos calados hasta 400 milímetros aparecen superpuestos en los puntos representados en la gráfica. La variación de esta relación teórica con el calado en el rango representado es inferior al 5 por mil, tal y como puede comprobarse en la gráfica 16, en la que se muestra la relación lineal obtenida entre el calado y el factor adimensional de alturas teóricas reales y virtuales ($r^2=0.9984$).

Las siguientes figuras representan los barridos experimentales del objeto realizados con el 3D Scanner. La figura 17 corresponde a la nube de puntos obtenida en las mediciones, y la figura 18 a la ventana del programa Matlab que fue utilizado para la visualización de resultados y post-proceso.

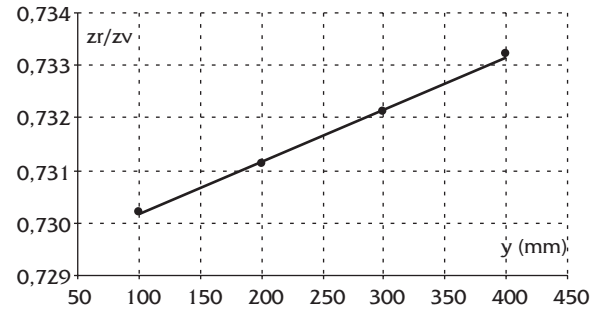


Figura 16. Relación adimensional entre alturas reales y virtuales respecto al calado

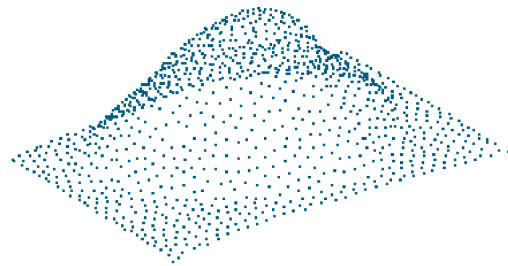


Figura 17. Mediciones del objeto patrón con el 3D-Scanner

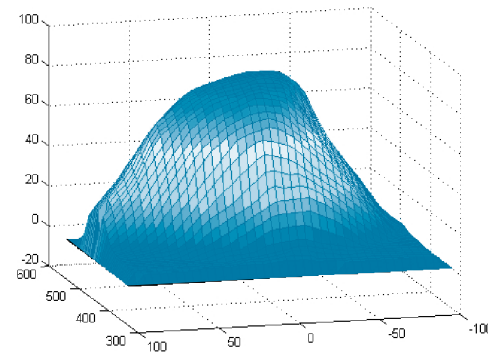


Figura 18. Visualización del objeto patrón con Matlab

En las figuras anteriores puede observarse el fondo y extraer la línea media, de la misma forma que se hizo con los ensayos con fondo plano. Para analizar la repetibilidad de la medida, se ha representado en la gráfica 19 la superficie del objeto con los cuatro barridos realizados con el mayor calado, correspondiente a 316 milímetros.

Puede comprobarse una desviación similar en las líneas de tendencia correspondientes al avance y el retroceso del sistema de medición, tal y como se comprobó con fondo plano (figura 10). Además, las variaciones en las medidas son muy pequeñas, del orden de 0.3 milímetros. Realizando la media de los cuatro barridos, y representando las mediciones con respecto a tres de los calados analizados, incluyendo la comparación con la situación existente sin refracción, obtenemos la figura 20.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

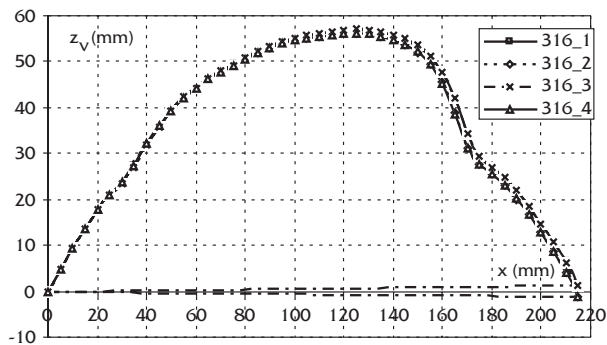


Figura 19. Perfil del objeto con los cuatro barridos ($y=316$ mm)

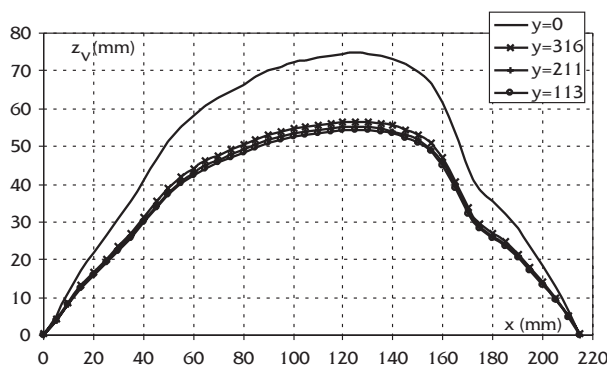


Figura 20. Perfiles del objeto patrón con diferentes calados

Si representamos ahora los valores de las alturas virtuales frente a las alturas reales, obtenemos la figura 21 que se muestra a continuación.

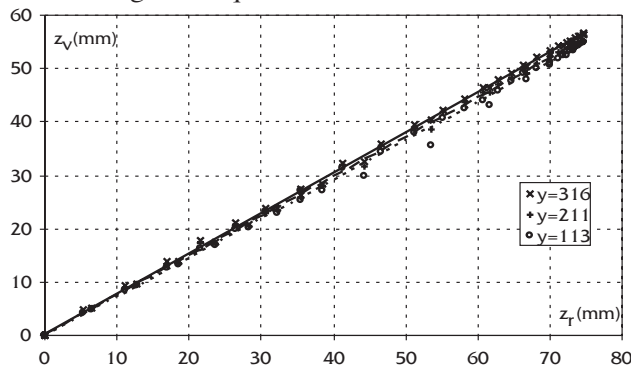


Figura 21. Relación experimental entre altura real y altura virtual

La gráfica anterior muestra resultados coincidentes con la relación teórica obtenida en la figura 15. En primer lugar es importante comentar que el alejamiento respecto a la bisectriz ($z_v = z_r$) refleja la influencia de la refracción en las mediciones realizadas. En la zona correspondiente a puntos con mayores elevaciones respecto del fondo existe una acumulación importante de datos, correspondientes a la medición de la parte superior del objeto analizado, en la que encontramos una pequeña planicie con irregularidades.

El resultado más importante son las relaciones lineales obtenidas con elevadas correlaciones (valores de r^2 entre 0.9977 y 0.9992), que permite validar de nuevo la metodología seguida en el estudio, en este caso con la restitución de un objeto introducido en el canal con distintas alturas de la lámina de agua. Por otro lado, la forma del objeto y su acusada pendiente en algunos puntos, provoca que existan zonas en las que el efecto de la refracción y la desviación del haz láser respecto de la vertical sean mayores, lo que dificulta la medición y el registro preciso de las elevaciones. Este efecto puede notarse en la gráfica 22 en el intervalo de alturas reales entre 40 y 55 milímetros, y con el valor más bajo del calado. En este caso la lámina de agua se ve afectada por la presencia de dicho objeto, produciendo mayores inestabilidades en la superficie que son detectadas por el 3D-Scanner. Este detalle puede observarse con mayor detalle si estudiamos las desviaciones de las alturas virtuales correspondientes a cada calado respecto de su recta de regresión. (figura 23).

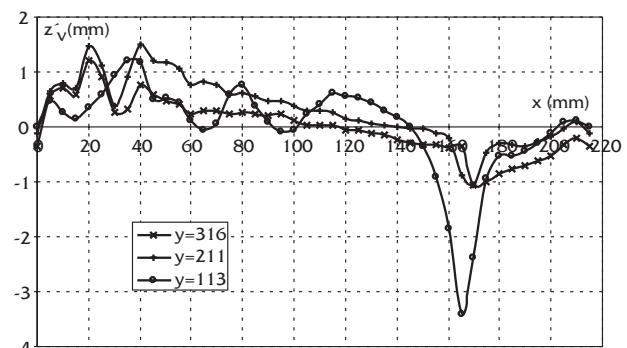


Figura 22. Desviaciones de las medidas del perfil del objeto respecto de la recta de regresión con distintos calados

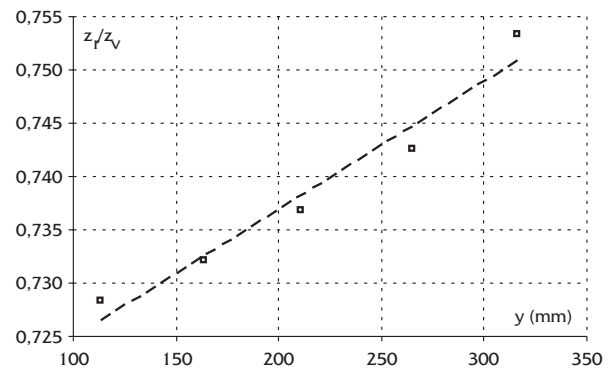


Figura 23. Relación entre el cociente de alturas reales y virtuales en función del calado y

Como puede observarse, el error de medida está en la mayoría de los casos por debajo del milímetro, exceptuando la zona comentada anteriormente. En el análisis de las figuras anteriores se percibe

cierta influencia del calado en las mediciones realizadas, con un ligero incremento de la pendiente con el aumento de la altura de la lámina de agua (figura 21). En la siguiente gráfica se detalla la relación obtenida en el análisis adimensional de las alturas reales y virtuales, frente al calado ($r^2=0.9585$).

Restitución de la refracción. Precisión y ruido

Los resultados anteriores reflejan la adecuación del 3D-Scanner para reproducir el comportamiento teórico desarrollado. De esta forma se han obtenido dos relaciones lineales entre las variables fundamentales de ambas series de ensayos (figuras 13 y 21).

$$r = C_1 \cdot y \tag{12}$$

$$z_v = C_2(y) \cdot z_r \tag{13}$$

En la segunda relación se ha mantenido la forma lineal porque, si bien el valor de C_2 depende del calado y , tal como se vio en la figura 21, éste se mantendrá constante o cuasi estacionario a lo largo de los ensayos, por lo que se considerará como tal.

Como resumen del procedimiento podemos indicar que, para una determinada configuración del equipo con una elevación prefijada desde el fondo del canal, quedan determinadas las constantes C_1 y C_2 , que son obtenidas a través de una serie de pruebas previas de calibración. De esta forma, y para cada ensayo posterior en régimen no permanente, el 3D-Scanner medirá las distancias a la superficie del objeto, que podrán ser convertidas en alturas reales sobre el fondo, tal y como muestra la siguiente relación.

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_v = \frac{1}{C_2} (z_m - r) = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} y \tag{14}$$

Estas conclusiones hacen referencia obligatoriamente a las condiciones existentes en la experimentación realizada, advirtiendo sobre la necesidad de realizar varios ensayos previos conjugando los distintos elementos para la obtención de buenos resultados.

El presente estudio demuestra así la aplicación que el 3D-Scanner tiene en el estudio de la restitución de superficies de objetos, y su potencial utilización en la determinación en tiempo real de la evolución de un lecho de sedimentos en la línea central del haz láser emitido, mediante una técnica automatizada y no intrusiva.

Por otro lado, la precisión y resolución globales, de acuerdo con las expresiones analizadas en el apartado anterior, están determinadas por la precisión del 3D-Scanner establecida en 0.5 milímetros, la magnitud y precisión de medida de las constantes, y la precisión en la medida del calado, también con un valor igual a 0.5 milímetros. Las constantes C_1 y C_2 se obtienen de forma estadística con una correlación muy próxima a uno ($r^2=0.9998$ para C_1 , $r^2=0.9977$ para C_2), y sus valores absolutos en los ensayos realizados son de 0.2694 y 0.7385, correspondientes a las pendientes de las figuras 13 y 21, respectivamente.

Realizando un análisis de errores en la ecuación (14), e introduciendo los valores obtenidos en la calibración, obtenemos el error total en la medida de las elevaciones reales del fondo.

$$\Delta z_r = \frac{1}{C_2} \Delta z_m + \frac{C_1}{C_2} \Delta y = 1.354 \cdot \Delta z_m + 0.365 \cdot \Delta y = 0.860 \tag{15}$$

donde Δz_m es el error en la medida del escáner (0.5 milímetros), Δy el error en la medida del calado (0.5 milímetros).

COMPARACIÓN DEL REGISTRO DEL FONDO CON UN VELOCÍMETRO PIV

En este apartado se comparan los resultados obtenidos en el registro del perfil del fondo con el 3D-Scanner y con un velocímetro de partículas PIV, el cual fue utilizado en este estudio para la medición de las elevaciones de un fondo de sedimentos. Los ensayos para dicha comparación se realizaron en el laboratorio de Hidráulica presentado anteriormente, y en el que se comprobó la aplicación del 3D-Scanner.

Un aspecto que no debe olvidarse es el potencial mayor del 3D-Scanner en el registro de la elevación del fondo en tres dimensiones, aportando resultados diferenciados de los obtenidos con el PIV. Como ya se ha comentado anteriormente, únicamente se incluyen en este artículo los resultados correspondientes a la línea central del haz láser, que se hicieron coincidentes con el plano de medición con ambos instrumentos, para de esta forma comparar las series de resultados experimentales. En la figura 24 puede apreciarse la colocación de la instrumentación para el funcionamiento conjunto.

DETERMINACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DE UN FONDO DE SEDIMENTOS UTILIZANDO UN ESCÁNER TRIDIMENSIONAL

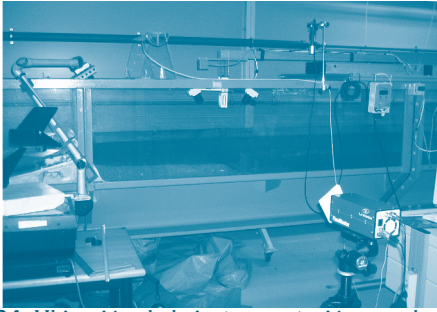


Figura 24. Ubicación de la instrumentación para la comparación entre 3D-Scanner y PIV

El ensayo con el que se realizó la comparación que aquí se presenta fue realizado para conocer la evolución de los perfiles del fondo en un lecho de sedimento no cohesivo en las inmediaciones de un vertedero. Para ello se dispuso en la zona central del canal una capa de arena gruesa en la parte situada inmediatamente aguas arriba del mismo. Desde el exterior fueron impuestas unas condiciones de flujo que provocasen la erosión hasta alcanzar un perfil final de equilibrio, sin introducir ningún aporte de sedimentos. El caudal introducido fue de $0.0218 \text{ m}^3/\text{s}$, la pendiente se mantuvo horizontal, y el espesor inicial de la capa de sedimento fue de 0.012 metros.

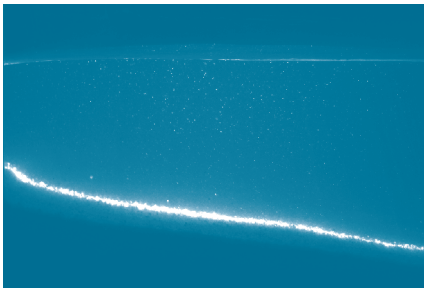


Figura 25. Perfil del fondo obtenido con PIV

En la figura 25 siguiente puede contemplarse el perfil del fondo registrado con el PIV, mientras que en la figura 26 se muestra una imagen con el 3D-Scanner.

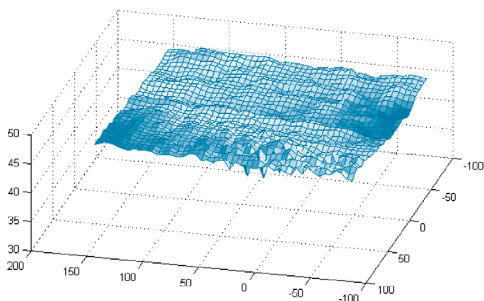


Figura 26. Perfil del fondo obtenido con 3D-Scanner

En este último caso fueron extraídas las medidas de la línea media del haz láser, realizando a

continuación la transformación inversa de la refracción. En la figura 27 se muestran la comparación de los resultados obtenidos con ambos instrumentos en la sección media del canal, en diferentes instantes de tiempo. Las diferencias numéricas se calcularon a través del error cuadrático medio de las medidas con el 3D-Scanner respecto a las de la técnica PIV, mediante la siguiente expresión.

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_{iPIV})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (16)$$

donde n es el número de puntos de medida (número de secciones transversales).

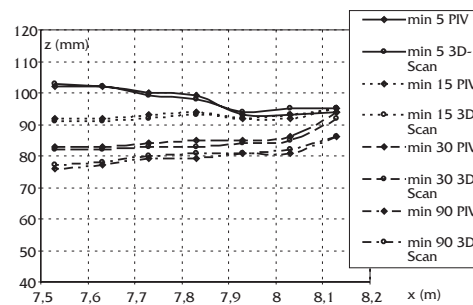


Figura 27. Comparación de perfiles del fondo. Coronación del vertedero en sección 8.3

Tabla 1. Error cuadrático medio entre las medidas realizadas con PIV y 3D-Scanner

Tiempo	Error cuadrático medio (mm)
Minuto 5	0.463
Minuto 15	0.345
Minuto 30	0.556
Minuto 90	0.267

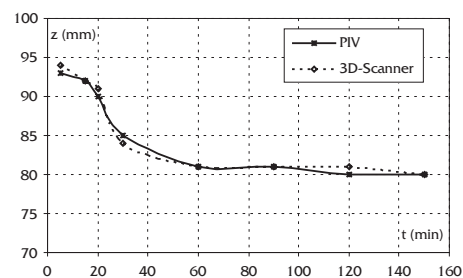


Figura 28. Perfil longitudinal de la evolución del lecho

Los valores obtenidos reflejan la gran similitud entre los resultados registrados con ambos instrumentos, de forma visible ya en el gráfico, y que reflejan con precisión el perfil final de equilibrio. En la figura 28 se ha representado la evolución temporal del perfil del lecho, aportando la comparación del análisis realizado en la sección situada 7.9 metros desde aguas arriba del canal, tanto con el 3D-Scanner, como con la técnica PIV.

CONCLUSIONES

Ha quedado justificada la capacidad de un escáner láser tridimensional para digitalizar en tiempo real la superficie de un lecho de sedimentos. Este instrumento, denominado 3D-Scanner proyecta un haz láser sobre la superficie a representar, y ha sido aplicado con buenos resultados para la medición de la línea media de un lecho de material granular bajo una lámina de agua.

Los resultados de los ensayos de calibración, realizados para cuantificar el efecto de la refracción del haz láser, muestran una relación lineal entre el calado y las mediciones del fondo de un canal hidráulico. También se obtiene una relación lineal entre las elevaciones reales de los puntos de un objeto patrón y las alturas virtuales registradas. Estas dos conclusiones coinciden con los respectivos estudios teóricos basados en la ley de la refracción de Snell.

La resolución alcanzada en todas las mediciones es inferior al milímetro, reflejando la capacidad de este instrumento para resolver las elevaciones del lecho de sedimentos de forma precisa y no intrusiva en el medio. Estos resultados son complementados con la realización de un ensayo con transporte de sedimentos, presentando la comparación con las medidas de un velocímetro de partículas PIV en el mismo plano de medición, mostrando la coincidencia del registro del perfil del fondo con ambos instrumentos. Los resultados aquí expuestos son sin duda esperanzadores, reflejando una potencialidad muy alta en la extensión a la medición tridimensional de los perfiles del fondo.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_1, C_2	constantes de calibración
n	índice de refracción
θ_i, θ_r	ángulos de incidencia y refracción
r	elevación virtual del fondo del canal
r'	desviación de las medidas del perfil del fondo respecto de la recta de regresión
y	calado
z_r	altura real del fondo
z_m	altura del fondo medida con el 3D-Scanner
z_v	altura relativa o virtual

REFERENCIAS

Adrian, R.J. (1996). "Bibliography of Particle Image Velocimetry using imaging methods: 1917-1995". TAM Report, 817, Universidad de Illinois, Urbana-Champaign, USA.

- Fang, T. y Piegl, L. A. (1995). "Delaunay Triangulation in Three Dimensions". IEEE Computer Graphics and Applications 15(5): 62-69.
- Grant I. (1997). "Particle Image Velocimetry: a review". Proceedings of Institute of Mechanical Engineers 211(c): 55-76.
- Hersch, R.W. (1999). "Hydrometry: Principles and Practices". Ed. John Wiley&Sons, UK.
- Hirsch, K.D. (1993). "Particle Image Velocimetry. Speckle Metrology". Ed. R.S. Sirohi. New York, USA.
- LaVision. (2000). "PIV Hardware Manual for Davis 5". Editado por LaVision, Göttingen, Alemania
- Lodha, S. K. y R. Franke. (1999). "Scattered Data Techniques for Surfaces". Proceedings of Dagstuhl Conference on Scientific Visualization, IEEE Computer Society Press, páginas 182-222.
- McCallum, B., Nixon, M., Price, B. y Fright, R. (1998a). "A Feasibility Study of Hand-held Laser Surface Scanning". Proceedings Image and Vision Computing New Zealand, Lower Hutt, páginas 103-108.
- McCallum, B., Nixon, M., Price, B. y Fright, R. (1998b). "Hand Held Laser Scanning in Practice". Proceedings Image and Vision Computing New Zealand, University of Auckland, páginas 17-22.
- Nixon, M., McCallum, B., Fright, R. y Price, B. (1998). "The Effects of Metals and Interfering Fields on Electromagnetic Trackers". Presence, MIT Press 7(2): 204-218.
- Peña, E., Fe, J., Sánchez-Tembleque, F. y Puertas, J. (2002). "A 2D numerical model using finite volume method for sediment transport in rivers". Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics, 1: 693-698. Louvain-la-Neuve, Bélgica. ISBN 90-5809-509-6
- Puertas, J., Peña, E. y Sánchez-Tembleque, F. (2002). "Experimental techniques for sediment transport using PIV and 3D Scanning Technologies". Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics, 2:1233-1237. Louvain-la-Neuve, Bélgica. ISBN 90-5809-509-6
- Polhemus. (2002). "3Space FastScan. Hand Held Laser Scanner User's Manual". Polhemus Incorporated, Colchester, Vermont USA
- Raffel, M., Willert, C.E. y Kompenhans, J. (2000). "Particle image velocimetry. A practical guide". Ed. Springer Verlag.
- Savchenko, V. V., Pasko, A. A., Okunev, O. G., y Kunii, T. L. (1995). "Function Representation of Solids Reconstructed from Scattered Surface Points and Contours". Computer Graphics Forum 14(4): 181-188.

AGRADECIMIENTOS

Los firmantes de este artículo agradecen el apoyo recibido por la Universidad de A Coruña a través de la Convocatoria de Proyectos de Investigación presentados por Equipos en Formación del año 2003.