

Departamento de Métodos Matemáticos
y de Representación



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

TESIS DOCTORAL

Medición con láser e imaxe digital de superficies de sedimentos
en un laboratorio de hidráulica

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache

Directores:
Jerónimo Puertas Agudo
Enrique Peña González

Año 2014

Medición con láser e imagen digital de superficies de sedimentos en un laboratorio de hidráulica

Autor: Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache

Tesis Doctoral UDC / 2014

Directores: Jerónimo Puertas Agudo
Enrique Peña González

Departamento de Métodos Matemáticos y de Representación
Programa de Doctorado en Ingeniería Civil



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

they form a pattern
yet to be matched
by the surface simplicity
but the darkest pit in me
it's pagan poetry

Björk Guðmundsdóttir

Para Ana

Agradecimientos

Quiero dedicar unas líneas para agradecer todo el apoyo recibido durante la realización de esta Tesis Doctoral. Una lista de agradecimientos en un trabajo tan extendido como este -al menos en el tiempo- corre siempre el riesgo de ser injusta y olvidar a alguien en el camino.

Quiero empezar agradecer la posibilidad de realizar este trabajo al Dr. Jerónimo Puertas Agudo, codirector del mismo y cuyas ideas han servido para las líneas maestras de su desarrollo. Y por supuesto al Dr. Enrique Peña González, compañero de laboratorio en los inicios y que me ha dado siempre apoyo, ánimo y fuerzas cuando lo he necesitado, además de dirigir los proyectos para los que este trabajo ha sido útil en alguna manera.

Amigos y compañeros en el CITEEC y en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, en especial a todos aquellos que han participado en los experimentos de algún modo como Jose Anta, Javier Ferreras, y a todos los técnicos que están o han estado –Esteban, Dani, Miguel, Paula, Gonzalo y Jose María-. También a los compañeros de trabajo del proyecto CoSSEDM, Iván Cáceres y Jose Alsina.

Finalmente a mi familia y amigos, en especial a Lorena y a mis padres, que han esperado pacientemente este momento sin desesperar en ningún caso, aunque motivos no les faltasen.

Resumen

Los fenómenos de erosión, transporte y sedimentación juegan un papel muy importante en relación con las obras hidráulicas y el entorno que las rodea. La forma de estudiar estos procesos ha evolucionado mucho con el desarrollo de modelos numéricos de simulación, pero siguen existiendo algunos casos en los que la mejor opción sigue siendo un modelo a escala de laboratorio con lecho de sedimentos móvil, tanto en estudios fluviales como en estudios de erosión costera.

Recientes avances en instrumentación de laboratorio han conseguido que el estudio de la hidrodinámica llegue a un nivel de detalle inimaginable hace poco tiempo, pero los instrumentos necesarios para observar y medir los procesos de transporte de sedimentos no han alcanzado aún ese nivel.

El principal objetivo de esta investigación ha sido el desarrollo de varias herramientas similares en su tecnología, basada en la iluminación láser y la toma de imágenes digitales, para medir la topografía de un fondo de sedimentos.

Para ello se han utilizado para dos equipos científicos comerciales destinados a otro uso que han debido ser adaptados al nuevo cometido, y por otro lado se ha empleado un láser y una cámara de uso no científico para con técnicas fotogramétricas y de visión artificial.

El resultado final es una gama de herramientas capaces de medir en dos y tres dimensiones un fondo de sedimentos para estudiar su variación en el tiempo, capaces de una resolución espacial y temporal no existente hasta ahora y que no son intrusivas. Estas herramientas se han empleado en proyectos reales para medir lechos fluviales, perfiles de playa y estructuras.

Resumo

Os fenómenos de erosión, transporte e sedimentación xogan un papel moi importante en relación coas obras hidráulicas e o ámbito que as rodea. A forma de estudar estes procesos evolucionou moito co desenvolvemento de modelos numéricos de simulación, pero seguen existindo algúns casos nos que a mellor opción segue sendo un modelo a escala de laboratorio con leito de sedimentos móbil, tanto en estudos fluviais coma en estudos de erosión costeira.

Recentes avances en instrumentación de laboratorio conseguiron que o estudo da hidrodinámica chegue a un nivel de detalle inimaxinable hai pouco tempo, pero os instrumentos necesarios para observar e medir os procesos de transporte de sedimentos non alcanzaron aínda ese nivel.

O principal obxectivo desta investigación foi o desenvolvemento de varias ferramentas similares na súa tecnoloxía, baseada na iluminación láser e a toma de imaxes dixitais, para medir a topografía dun fondo de sedimentos.

Para iso utilizáronse dous equipos científicos comerciais destinados a outro uso que deberon ser adaptados ao novo labor, e por outro lado empregouse un láser e unha cámara de uso non científico para con técnicas fotogramétricas e de visión artificial.

O resultado final é unha gama de ferramentas capaces de medir en dúas e tres dimensións un fondo de sedimentos para estudar a súa variación no tempo, capaces dunha resolución espacial e temporal non existente ata agora e que non son intrusivas. Estas ferramentas empregáronse en proxectos reais para medir leitos fluviais, perfís de praia e estruturas.

Abstract

The phenomena of erosion, transport and sedimentation play an important role in relation to the waterworks and the surrounding environment. The way to study these processes has evolved greatly with the development of numerical simulation models, but there are still some cases in which the best choice is still a laboratory scale model with mobile bed sediment in river and in coastal erosion studies.

Recent advances in laboratory instrumentation have made the study of hydrodynamics reach a level of detail unimaginable a short time ago, but the tools necessary to monitor and measure the processes of sediment transport have not yet reached that level.

The main objective of this research has been the development of several tools similar in their technology based on laser lighting and digital imaging to measure the topography of a bed sediment.

For that purpose on one hand two commercial scientific equipment have been tweaked to the new task, and on the other hand a non-scientific laser and a camera have been used with photogrammetry and computer vision techniques.

The end result is a range of tools that can measure a sediment bed in two and three dimensions to study their variation in time, capables of spatial resolution and temporal nonexistent so far and they are not intrusive. These tools have been employed in real projects to measure riverbeds, beach profiles and structures.

Índice general

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral

1. Introducción, objetivos, estructura, resultados y conclusiones.
 - 1.1. Introducción. Herramientas de diseño en ingeniería fluvial y marítima.
 - 1.2. Principales objetivos de esta Tesis Doctoral.
 - 1.3. Estructura de la Tesis Doctoral.
 - 1.4. Principales resultados y conclusiones.
 - 1.4.1. Medición de superficies de sedimentos bajo una lámina de agua con un escáner comercial.
 - 1.4.2. Medición de perfiles de sedimentos sumergidos en una imagen obtenida con un velocímetro de imagen de partículas.
 - 1.4.3. Medición de perfiles en imágenes tomadas con un equipo de bajo coste.
 - 1.4.4. Conclusiones.
2. Estado del conocimiento
 - 2.1. Introducción. Laboratorios de ingeniería fluvial y marítima.
 - 2.1.1. Introducción histórica.
 - 2.1.2. Modelos físicos en transporte de sedimentos.
 - 2.1.3. Instrumentación para estudios con fondo móvil.
 - 2.1.4. Medida de velocidades y tensiones tangenciales.
 - 2.1.5. Medida del transporte de fondo y en suspensión.
 - 2.2. Medidas de fondos de sedimentos.
 - 2.2.1. Sedimentos sumergidos y emergidos. Medidas intrusivas.
 - 2.2.2. Medidas puntuales en una dimensión.
 - 2.2.3. Medidas en dos dimensiones basadas en vídeo convencional.
 - 2.2.4. Medidas en dos y tres dimensiones basadas en imagen digital y luz estructurada.
 - 2.3. Medida de superficies con un escáner de luz estructurada.
 - 2.3.1. Fotogrametría y visión artificial. Visión estereoscópica frente a luz estructurada.
 - 2.3.2. Luz estructurada. Iluminación convencional y láser. Refracción y dispersión cromática.
 - 2.3.3. Formación de la imagen. Lentes fotográficas: deformaciones cilíndricas y de perspectiva.

- 2.3.4. Adquisición de imágenes. Sensores digitales y evolución en la última década.
- 2.3.5. Mapeado de píxeles a coordenadas reales.
- 2.3.6. Equipos comerciales y experimentales. Polhemus FastScan.
- 2.4. Tratamiento de imágenes.
 - 2.4.1. Ajuste y reconocimiento de patrones.
 - 2.4.2. Correlación cruzada en 1, 2 y 3 dimensiones.
 - 2.4.3. Correlación cruzada discreta.
 - 2.4.4. Obtención del pico de correlación. Interpolación subpíxel.
- 3. Equipos y montajes experimentales.
 - 3.1. Introducción. Resumen de montajes experimentales.
 - 3.2. Escáner comercial. Principios de funcionamiento y adaptación al laboratorio.
 - 3.2.1. Introducción
 - 3.2.2. Adquisición de coordenadas. Triangulación activa.
 - 3.2.3. Posicionamiento global mediante campos electromagnéticos.
 - 3.2.4. Reconstrucción de superficies. Opciones de exportación.
 - 3.2.5. Modelado de superficies. Conversión a una malla regular.
 - 3.2.6. Equipos auxiliares. Desplazamiento en ejes cartesianos.
 - 3.2.7. Pruebas iniciales.
 - 3.3. Perfiles en dos dimensiones. Restitución de la refracción.
 - 3.3.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción del plano medio
 - 3.3.2. Ensayos de calibración con fondo plano.
 - 3.3.3. Ensayos de calibración con patrón de geometría conocida.
 - 3.3.4. Restitución de la refracción. Obtención de perfiles sumergidos.
 - 3.4. Superficies en tres dimensiones. Restitución de la refracción.
 - 3.4.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción en tres dimensiones.
 - 3.4.2. Elevación y curvado de un fondo plano.
 - 3.4.3. Identificación de puntos individuales en un patrón.

- 3.4.4. Calibración bajo una lámina de agua.
- 3.4.5. Restitución de la refracción.
- 3.5. Perfiles en dos dimensiones. PIV en plano longitudinal.
 - 3.5.1. Introducción. Perfiles de fondo en una imagen PIV.
 - 3.5.2. Localización del máximo de luminancia.
 - 3.5.3. Corrección de la distorsión. Funciones de orden superior.
- 3.6. Obtención de perfiles con equipos de bajo coste.
 - 3.6.1. Equipos láser y cámaras de bajo coste.
 - 3.6.2. Calibración con un patrón.
 - 3.6.3. Corrección gráfica de la perspectiva. Medidas semicuantitativas.
 - 3.6.4. Corrección numérica de la perspectiva. Medidas cuantitativas.
 - 3.6.5. Perfiles en un video digital de alta definición.
 - 3.6.6. Detección de eventos run-up y run-down.
- 4. Análisis de errores: Precisión y resolución.
 - 4.1. Características de los sistemas de imagen como instrumentos de medida.
 - 4.2. Condiciones de medida.
 - 4.3. Precisión y resolución.
 - 4.3.1. Medidas tomadas con un escáner 3D.
 - 4.3.2. Medidas tomadas con un equipo PIV.
 - 4.3.3. Medidas tomadas con un equipo de imagen convencional.
 - 4.4. Veracidad y calibración.
 - 4.4.1. Calibración de las medidas tomadas con el escáner 3D.
 - 4.4.2. Calibración de las medidas tomadas con el PIV.
 - 4.4.3. Calibración de las medidas tomadas con el equipo de video convencional.
 - 4.5. Ruido. Postprocesado con restricciones morfodinámicas.
 - 4.5.1. Introducción.
 - 4.5.2. Postprocesado de las medidas tomadas con el escáner 3D.
 - 4.5.3. Postprocesado de las medidas tomadas con el equipo de imagen convencional.

- 4.6. Medidas absolutas y relativas.
- 4.7. Comparación entre sistemas.
- 5. Aplicaciones.
 - 5.1. Resumen de aplicaciones prácticas.
 - 5.2. Validación de un modelo numérico de transporte de sedimentos.
 - 5.2.1. Presentación.
 - 5.2.2. Instalaciones de la ETSI Caminos de la UDC.
 - 5.2.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.
 - 5.3. Análisis de daño en el tronco de un dique en talud.
 - 5.3.1. Presentación.
 - 5.3.2. Instalaciones de ensayo en el tanque de oleaje del CITEEC UDC.
 - 5.3.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.
 - 5.4. Morfodinámica de la zona de swash. Proyecto CoSSeDM.
 - 5.4.1. Presentación.
 - 5.4.2. Instalaciones del laboratorio CIEM UPC.
 - 5.4.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.
- 6. Potencialidades, limitaciones y futuros desarrollos.
 - 6.1. Potencialidades
 - 6.2. Limitaciones.
 - 6.3. Futuros desarrollos.
 - 6.3.1. Obtención de superficies con un equipo de bajo coste.
 - 6.3.2. Obtención de dos perfiles ortogonales con un equipo de bajo coste.
 - 6.3.3. Mejoras en las limitaciones de los equipos de bajo coste.
 - 6.3.4. Minería de datos en el proyecto CoSSeDM.

Bibliografía.

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Anexos.

Anexo 1. Contribuciones a congresos.

Anexo 2. Publicaciones indexadas.

1. Introducción, objetivos, estructura, resultados y conclusiones

1. Introducción, objetivos, estructura, resultados y conclusiones.
 - 1.1. Introducción. Herramientas de diseño en ingeniería fluvial y marítima.
 - 1.2. Principales objetivos de esta Tesis Doctoral.
 - 1.3. Estructura de la Tesis Doctoral.
 - 1.4. Principales resultados y conclusiones.
 - 1.4.1. Medición de superficies de sedimentos bajo una lámina de agua con un escáner comercial.
 - 1.4.2. Medición de perfiles de sedimentos sumergidos en una imagen obtenida con un velocímetro de imagen de partículas.
 - 1.4.3. Medición de perfiles en imágenes tomadas con un equipo de bajo coste.
 - 1.4.4. Conclusiones.

1.1. Introducción. Herramientas de diseño en Ingeniería Fluvial y Marítima.

El diseño de las obras que se construyen en los ríos para captación y vertido de agua, encauzamiento, protección del fondo y de las márgenes, o de las estructuras contenidas en su cauce están dentro de la *Ingeniería Fluvial*. La Ingeniería Fluvial estudia el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a caudales y niveles medios y extremos, las velocidades de flujo, las variaciones de fondo por socavación y sedimentación, la capacidad de transporte de sedimentos y los ataques contra las márgenes.

Un río es un medio con un flujo que implica a dos actores fundamentales, el agua y los lechos móviles de sedimentos. La importancia del estudio del flujo de agua es clara, pero no debe olvidarse el segundo por cuanto ambos son inseparables y por las consecuencias de los errores que puede originar no tenerlo en cuenta. La sedimentación y pérdida de capacidad de los embalses, la regresión de los deltas, la explotación admisible de árido y otros recursos, y la erosión general o localizada socavando la cimentación de obras viarias o específicamente fluviales son sólo los ejemplos más evidentes.

Un cauce aluvial es además un ecosistema en sí mismo, o para ser más precisos, constituye un *ecotono* –zona de transición entre varios ecosistemas- y es particularmente rico en biodiversidad. Pequeñas modificaciones en sus condiciones pueden tener consecuencias dramáticas en la fauna y la flora local, e incluso a distancias sorprendentemente grandes. Tomando como ejemplo el Delta del Ebro, embalses situados a cientos de kilómetros del mismo están afectando al aporte de sedimentos y provocando la regresión del mismo, y ello está influyendo negativamente en algunas poblaciones piscícolas del Mediterráneo por cuanto el propio delta es su zona de cría de alevines.

El proceso de producción de sedimentos en las cuencas y el transporte de los mismos por parte de las corrientes naturales es muy complejo. La cuantificación de los sedimentos para proyectos de Ingeniería se basa actualmente en mediciones y en la aplicación de métodos empíricos.

La Ingeniería Marítima se encuentra con el mismo tipo de problemas en el estudio de infraestructuras, ya sea naturales o bien construidas por el hombre. Las fuerzas hidrodinámicas provocadas por las corrientes y el oleaje tienen gran influencia en la evolución de los lechos móviles, y su modificación altera a su vez de manera

significativa las características del oleaje. Las consecuencias de esta modificación afectan también a las obras marítimas que interactúan de un modo u otro con lechos móviles como los pilotes de cimentación de estructuras, las obras lineales como emisarios o cables, estructuras flotantes fondeadas con muertos o anclas geotécnicas, o bien diques de cualquier naturaleza.

Entender los fenómenos de transporte de sedimentos en los lechos fluviales o marinos es sin duda un reto que continuará frustrando generaciones de ingenieros (Hughes, 1998). La interacción es tan compleja que hasta Albert Einstein previno a su hijo de dedicarse a estos estudios.

Los ingenieros hidráulicos cuentan con tres herramientas para el estudio de fenómenos relacionados con la hidráulica de los ríos, estuarios y el mar: observaciones y medidas de campo, observaciones y medidas de laboratorio en modelo físico (Mateos, 2000), y modelos matemáticos.

En los últimos 50 años, el conocimiento acerca de los procesos hidráulicos sobre un lecho móvil ha ido creciendo con estudios de campo y laboratorio. Sin embargo siguen existiendo lagunas en el mismo que hacen imprescindible continuar por el camino iniciado por Louis J. Fargue en 1875 con su modelo del río Garona.

Los modelos numéricos para el estudio de estos fenómenos se están desarrollando en paralelo a la potencia de los modernos ordenadores, pero aún no han alcanzado la competencia suficiente para sustituir a la experimentación, y deben ser validados por ésta. El cálculo es imperfecto fundamentalmente por la complejidad de los fenómenos de turbulencia y la dificultad de reproducir condiciones de contorno y fronteras reales. La realidad física es mucho más compleja que la simplificación que cualquier modelo implica. Los modelos de arrastre de sólidos son conceptualmente muy simples y se desprecian factores que en la práctica pueden ser relevantes.

La capacidad de algunos modelos comerciales ha hecho de algún modo descender el número de modelos físicos que se construyen y explotan. Los estudios de campo son habitualmente los que mejores datos arrojan acerca de los problemas concretos a los que se enfrentan los ingenieros fluviales, pero a expensas de ser muy costosos y depender de gran cantidad de variables naturales, haciendo que su interpretación sea complicada.

Existen –y seguirán existiendo durante mucho tiempo- determinadas condiciones en las que un modelo físico sigue siendo la alternativa más económica y fiable para este tipo de problemas.

La reproducción de unas determinadas condiciones en un modelo real, o bien la inexistencia del mismo, hace que la única posibilidad real de estudio sea la simulación en una réplica a escala reducida del problema. La construcción y explotación de un modelo reducido, si bien implica una inversión a veces elevada, supone siempre un ahorro real en el coste final de un proyecto de Ingeniería Fluvial o Marítima. La confianza que ofrece la observación directa de los fenómenos hidráulicos constituye además un valor añadido en sí mismo (Martín Vide, 2002).

En paralelo a la aparición de modelos numéricos y fórmulas validadas por la experimentación para el estudio de problemas hidráulicos, las dos últimas décadas han visto un despertar de una nueva generación de herramientas de medida, tanto en campo como en laboratorio, capaces de obtener datos de las principales variables físicas con una resolución y precisión impensables hasta hace poco tiempo.

Pero si bien las herramientas de medida de velocidades han alcanzado un grado de competencia suficiente para el estudio en detalle de los procesos principales en la parte hidráulica de los problemas, el estudio de la evolución temporal de los lechos móviles está muy lejos de alcanzar ese nivel, y así lo refleja la gran cantidad de equipos que están desarrollando tecnologías muy diversas con este mismo objetivo.

La Unión Europea a través de su 7º Programa Marco y dentro de esta iniciativa de colaboración entre laboratorios Hydralab ha reconocido la necesidad de estos estudios con los proyectos SANDS (Scaling and Analysis and New instrumentation for Dynamic bed TestS) y CoSSedM (Coupled High Frequency Measurement of Swash Sediment Transport and Morphodynamic). Parte de los estudios de esta tesis han sido empleados en el segundo.

Es en esa línea de trabajo en la que se inscribe esta tesis doctoral. La aplicación de tecnologías láser en el laboratorio de hidráulica fluvial es un campo relativamente nuevo y con un futuro muy prometedor. En el área de transporte de sedimentos, estas tecnologías serán usadas en esta investigación para estudiar la evolución en el tiempo de un fondo de sedimentos no cohesivos.

1.2. Objetivos de esta tesis doctoral

En la actualidad existen numerosas herramientas para la medición del flujo de agua en laboratorio con precisión, pero no así para el estudio de fenómenos de transporte de sedimentos. El objetivo general de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de una serie de herramientas similares en su tecnología básica, para la medición de superficies de fondo en lecho erosionable. Esta medida se hará, y ello es una de sus principales ventajas, **en régimen transitorio y de forma completamente automatizada y no intrusiva.**

Las citadas herramientas están basadas en las tecnologías láser y de imagen digital, y su principio de medida es, al menos en apariencia, sencillo: iluminar el fondo con un haz láser con forma de plano y tomar una imagen con una cámara digital. La intersección entre el plano de luz y el lecho constituye el perfil del mismo, que es observado y registrado en forma de imagen digital por el sistema de registro, ya sea este de fotografía fija o video.

Los antecedentes de esta Tesis Doctoral están en la realizada por Enrique Peña (2002a), y en la Tesina de Fin de Máster dentro del Programa Oficial de Postgrado en Ingeniería del Agua de la Universidad de A Coruña de este doctorando, en el desarrollo de las cuales se ha validado ya el procedimiento para medir perfiles del fondo de sedimentos en dos dimensiones (Peña, 2002b). El objetivo específico inicial es profundizar en el conocimiento de la medida de perfiles en dos dimensiones y extenderlo a tres dimensiones para obtener la superficie completa de una porción del lecho.

Este primer objetivo concreto de esta Tesis Doctoral es la adaptación de un sistema comercial de digitalización de superficies en tres dimensiones – *escáner*¹ 3D -, adquirido por el Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil (en adelante CITEEC) de la Universidade da Coruña (en adelante UDC), para la obtención de perfiles en dos dimensiones y superficies en tres dimensiones de un

¹ En la edición de 2001 del Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua aparece la voz *escáner* con la siguiente definición:

escáner. (Del ingl. *scanner*, el que explora o registra). m. *Electr.* Dispositivo que explora un espacio o imagen, y los traduce en señales eléctricas para su procesamiento. || 2. *Med.* Aparato que, por medio de diversos métodos de exploración, como los rayos X, el ultrasonido o la resonancia magnética, produce una representación visual de secciones del cuerpo.

lecho erosionable en un canal bajo una lámina de agua, teniendo en cuenta la refracción en la toma de imágenes.

El segundo objetivo específico es también una utilización no convencional de un equipo inicialmente previsto para la medida de campos de velocidades, un velocímetro de imagen de partículas (PIV). De las imágenes tomadas por el sistema se obtiene información sobre el fondo de sedimentos, con la ventaja añadida de que en este caso puede medirse simultáneamente la tensión tangencial en el fondo, variable que condiciona de manera definitiva el transporte de sedimentos.

Los dos objetivos anteriores responden a la siguiente pregunta:

¿Se puede tomar una imagen del fondo bajo una lámina de agua?

El tercer objetivo específico dentro la Tesis es responder a otra pregunta sencilla.

¿Se pueden realizar esas medidas con un equipo de mucho menor coste?

Los equipos anteriores (PIV y escáner 3D) son muy costosos y su tecnología básica –un láser y una cámara digital- existe en equipos comerciales destinados a uso no científico y que se pueden adaptar de igual modo para medir el fondo de sedimentos.

Además del montaje y prueba de los equipos de medida citados, un objetivo específico transversal de esta Tesis es el desarrollo de algoritmos robustos de visión artificial capaces de extraer de las citadas imágenes la información relevante con elevada precisión, inmunidad al ruido y de manera automática.

Es necesario en este momento hacer una referencia al marco temporal del trabajo, que se ha desarrollado a lo largo de una década. Durante este tiempo los objetivos iniciales -generales y específicos- no se han modificado sustancialmente pero si ha habido dos variaciones importantes:

- La primera se refiere a las herramientas disponibles. La evolución de la tecnología de las cámaras digitales en la última década ha permitido que los objetivos del proyecto se cumplan en mucho mayor grado.
- Las aplicaciones prácticas en proyectos reales de las tecnologías desarrolladas han pasado de posibles problemas sugeridos a los que aplicar estas medidas a proyectos reales en el laboratorio.

Además las técnicas de medida inicialmente previstas para los fondos de sedimentos en hidráulica fluvial se han extendido a la ingeniería costera e incluso a la medida de infraestructuras artificiales como diques de escollera.

1.3. Estructura de la Tesis Doctoral.

El presente documento sigue una estructura clásica de Tesis Doctoral experimental con un capítulo inicial del resumen, un capítulo sobre el Estado del Conocimiento, un capítulo central que desarrolla toda la parte experimental de la misma, un capítulo de análisis de los resultados obtenidos, uno de aplicación práctica a proyectos reales y uno final con las potencialidades, limitaciones y futuros desarrollos.

El **capítulo 2**, relativo a Estado del Conocimiento, tiene cuatro apartados:

- Introducción. Laboratorios de Ingeniería Fluvial y Marítima.
- Medidas de Fondos de Sedimentos.
- Medida de Superficies con un escáner de luz estructurada.
- Tratamiento de imágenes.

Se hará en primer lugar una introducción al problema de los modelos físicos a escala de laboratorio hidráulico con fondo móvil. Este tipo de estudios presentan muchas dificultades añadidas, tanto en el análisis dimensional como en la medida de parámetros hidro y morfodinámicos respecto de aquellos ensayos con fondo fijo. Se hará una breve descripción de la tecnología existente para medir otros parámetros en estos estudios como la velocidad, la tensión tangencial, el transporte de fondo y en suspensión. A pesar de que el objetivo de esta tesis no tiene que ver directamente con esas medidas, la aproximación global al problema y las posibles sinergias o interferencias entre equipos hace necesaria esa introducción.

Se estudiarán asimismo las alternativas para la medida de la topografía de un fondo de sedimentos en un laboratorio disponibles en la actualidad, comparando sus ventajas e inconvenientes, así como sus limitaciones que en parte pretenden subsanarse en esta Tesis.

Las técnicas que se emplearán están basadas en la proyección de luz estructurada y la toma de imágenes –fijas o video- con una cámara digital, para obtener de ellas

una medida de la superficie. Esta tecnología es relativamente nueva en el laboratorio de imagen pero no en otros campos, y se hará una breve descripción de los procesos implicados.

Finalmente para cerrar el Estado del Conocimiento se describirán brevemente parte de las técnicas de tratamiento de imagen, enmarcadas en el campo de la visión e inteligencia artificial, de las que se hará uso para desarrollar los algoritmos a lo largo del desarrollo de la Tesis.

El trabajo es en gran manera pluridisciplinar y se ha tratado por ello de no extender el Estado del Conocimiento más allá de lo necesario para enmarcar la investigación posterior. Las posibles ramificaciones del mismo son casi infinitas.

El **capítulo 3** de Metodología Experimental describirá los diferentes equipos y métodos empleados para la medida de superficies de sedimentos en diferentes condiciones.

En primer lugar se estudiará el empleo de un equipo comercial que no ha sido desarrollado para este fin en el laboratorio hidráulico. Se trata de un escáner de superficies sólidas que proyecta un haz láser montado solidariamente con dos cámaras que toman imágenes de la línea proyectada.

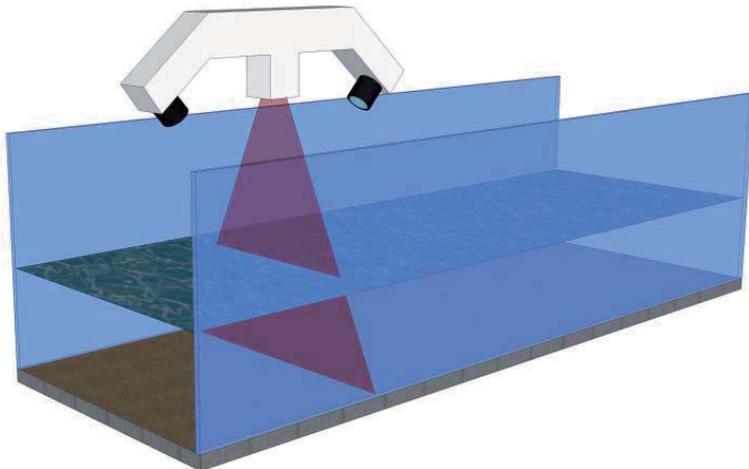


Figura 1.1. Escáner comercial en posición vertical fuera del agua.

A lo largo de los apartados 3.1, 3.2 y 3.3 se estudiarán las adaptaciones necesarias para su utilización en un canal de experimentación hidrodinámica, y el procesado

de los datos entregados por el equipo para corregir la distorsión de medida –en dos y tres dimensiones- introducida por la refracción en la superficie del agua.

En segundo lugar en el apartado 3.4 se estudiará el análisis de imágenes obtenidas por un velocímetro de imagen de partículas –en adelante PIV- en las que puede observarse un perfil de fondo.

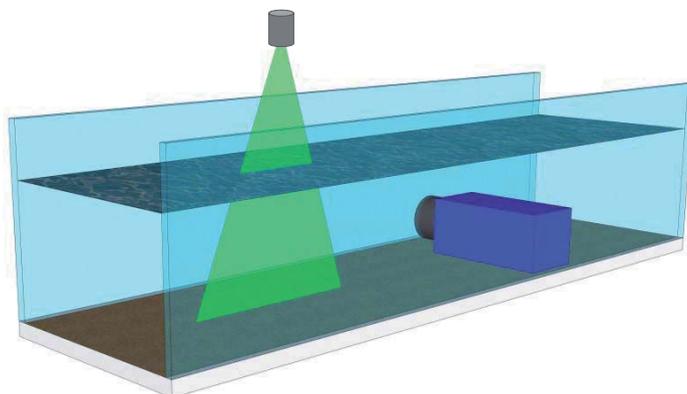


Figura 1.2. Velocímetro de imagen de partículas –PIV- en posición lateral

En este análisis se desarrollarán los algoritmos de extracción del perfil en la imagen y de calibración de la medida que serán empleados transversalmente en el resto de la Tesis y en futuros trabajos.

Estos algoritmos se han probado en muy diferentes condiciones para comprobar su robustez, inmunidad ante el ruido de medida y posibilidad de automatización de la misma sin la intervención del usuario.

Con los conocimientos adquiridos en los apartados anteriores, en el apartado 3.5 se han aplicado todas las técnicas disponibles para tomar las mismas medidas con equipos de bajo coste y uso no científico: un láser de nivelación de albañil y una cámara de fotografía comercial. Para ello se ha desarrollado el procedimiento de toma de imágenes y de calibración de las mismas para convertir píxeles en la imagen a unidades geométricas reales.

En una primera aproximación el procedimiento de calibración se ha empleado para tomar medidas semicuantitativas –perfiles dibujados sobre un gráfico con escala- de las secciones transversales de un dique de escollera.

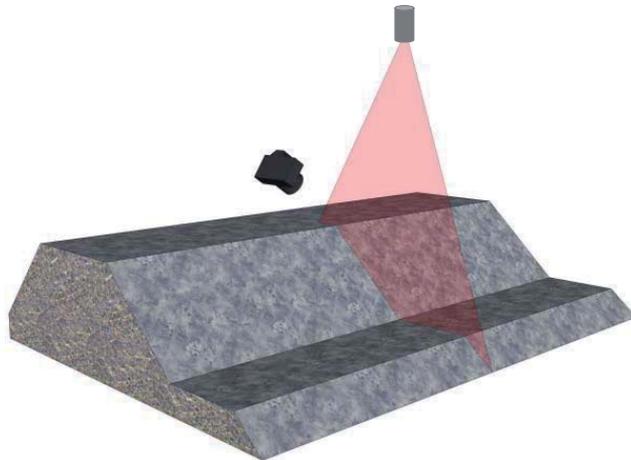


Figura 1.3. Equipo de bajo coste para medir el perfil transversal de un dique de escollera.

En una segunda aplicación práctica se ha realizado una calibración numérica y se han empleado las técnicas para extraer los perfiles de una imagen digital a partir de los fotogramas o cuadros (en inglés y de manera muy extendida frames) de una grabación de video digital en un canal de oleaje y poder estudiar su evolución temporal.

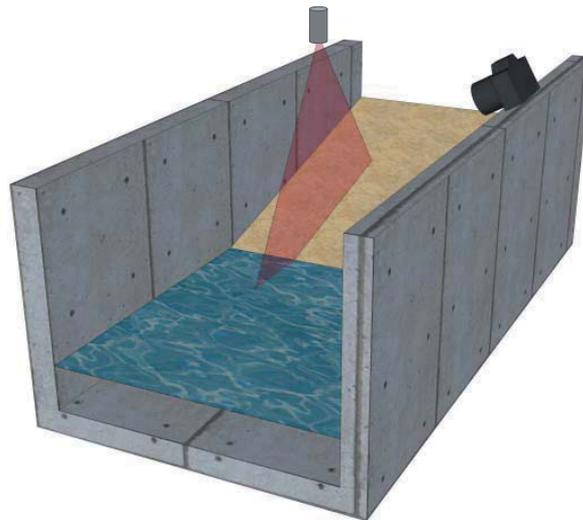


Figura 1.4. Equipo de bajo coste para medir el perfil longitudinal de una playa.

Los procedimientos estudiados en el capítulo 3 son en si mismos instrumentos de medida y como tales son analizados en el **capítulo 4** de análisis de errores en los resultados. Se han determinado sus características básicas tales como su campo de medida, precisión, veracidad, calibración y ruido, así como las técnicas posibles

para mejorar estas capacidades. Se compararán entre sí y con las alternativas existentes para realizar las mismas medidas.

El **capítulo 5** está destinado al estudio de tres aplicaciones prácticas de las herramientas de medida diseñadas en proyectos reales:

- El primer proyecto, realizado en el canal de hidráulica fluvial de la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la UDC, tuvo como objetivo la calibración de un modelo numérico de transporte de sedimentos y el estudio de la modificación de la curva de gasto de un vertedero de aforo al colmatarse por sedimentación.
- El segundo proyecto, realizado en la dársena de Puertos y Costas del CITEEC, no tiene relación directa con los objetivos iniciales de la Tesis de estudio de lechos sumergidos, pero las técnicas desarrolladas sirvieron de igual modo para el análisis de daño en el tronco de un dique de escollera sometido a oleaje a través de la medida de su perfil transversal. Estas medidas fueron obtenidas con el tanque de oleaje sin agua.
- El tercer proyecto, realizado en el Canal de Experimentación e Investigación Marítima (CIEM) de la Universidad Politécnica de Catalunya, tuvo como objetivo el estudio de la evolución del fondo de sedimentos en la zona cubierta y descubierta alternativamente por las olas, conocida como zona de swash. Estas medidas son tomadas cuando se retira la ola por lo que fue necesaria la programación de un algoritmo capaz de detectar este evento.

El **capítulo 6** hace un resumen final de las potencialidades y limitaciones de los equipos y algoritmos estudiados, así como de los posibles futuros desarrollos a los que abre puertas esta Tesis.

Finalmente los **capítulos 7 y 8** contienen una relación de las referencias bibliográficas del documento y un anexo con la relación de contribuciones a congresos y el texto de artículos publicados en revistas indexadas a los que ha dado lugar este trabajo de investigación.

1.4. Principales resultados y conclusiones.

1.4.1. Medida de superficies de sedimentos bajo una lámina de agua con un escáner comercial.

La primera parte del desarrollo experimental y aplicado de esta Tesis Doctoral se refiere a la adaptación de un equipo comercial -escáner 3D- a un uso para el que no estaba previsto. El principio de medida del mismo puede verse esquematizado en la figura.

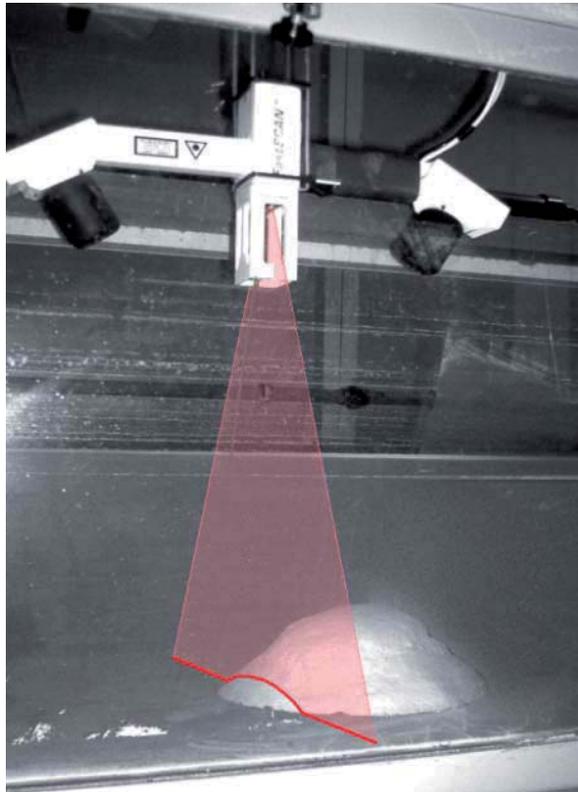


Figura 1.5. Principio de medida del escáner comercial.

Un plano de luz láser ilumina la superficie de un objeto. La línea de intersección con el mismo es observada por dos cámaras que obtendrán, como resultado de la medida, las coordenadas de una serie de puntos. Desplazando la *pistola* que tiene el emisor láser y las cámaras, de un modo similar a la pintura en spray, podemos cubrir toda la superficie del objeto.

El resultado de la medida es una nube de puntos como la de la figura, que deberá transformarse en una superficie mediante alguna representación aproximada.

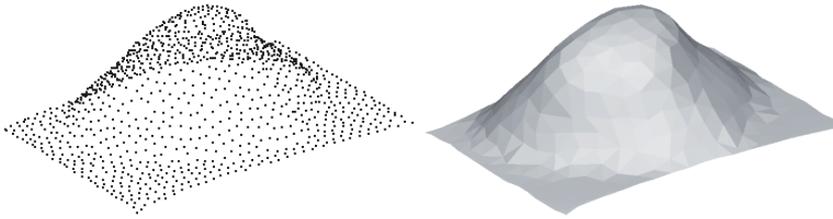


Figura 1.6. Resultado de medida del escáner como puntos y como malla de polígonos.

Sin embargo, el hecho de utilizar el equipo para medir una superficie sólida bajo una lámina de agua condicionará los resultados, siendo necesario tener en cuenta la refracción: tanto el plano láser como la imagen tomada por las cámaras se verán afectadas por ella y esto deberá ser tenido en cuenta para corregir los resultados obtenidos por el escáner, lo que no siempre será posible.

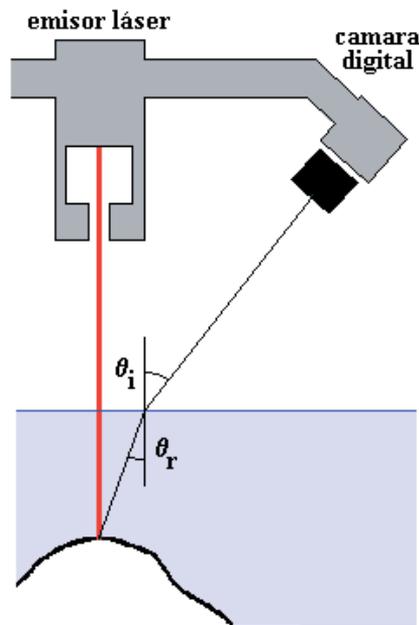


Figura 1.7. Desviación de las medidas por refracción en dos dimensiones.

Una excesiva curvatura de la superficie libre, por ejemplo, hará que la transformación en la imagen no pueda ser restituida, o incluso que se produzca una reflexión total y el láser no atraviese la superficie de separación aire-agua.

En una primera aproximación al problema se ha estudiado el punto central del abanico proyectado por el láser, que sufre la refracción únicamente en un plano.

Se ha realizado un análisis teórico y experimental de las transformaciones producidas por la refracción en las medidas, que consisten en una elevación aparente de los objetos –calibrada midiendo la elevación del fondo del canal- y un achatamiento de los mismos –calibrado midiendo un objeto patrón con diferentes láminas de agua sobre él-. Ambas transformaciones son asimilables a una función lineal en el rango de medida.

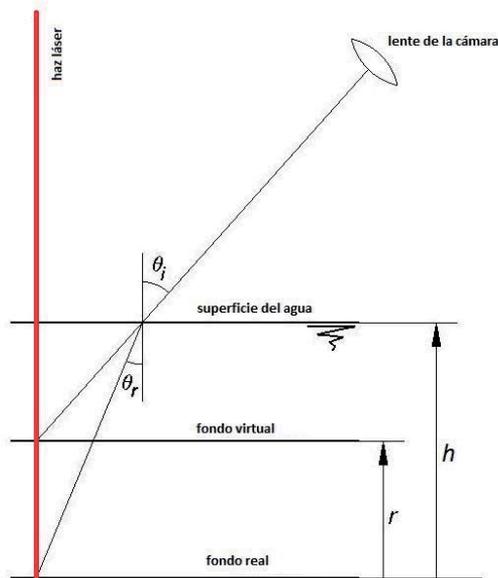


Figura 1.8. Elevación aparente del fondo del canal debido a la refracción.

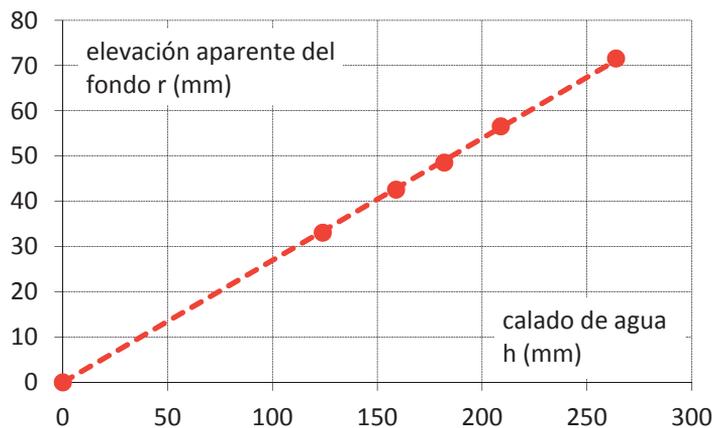


Figura 1.9. Elevación aparente del fondo (r) en función del calado (h)

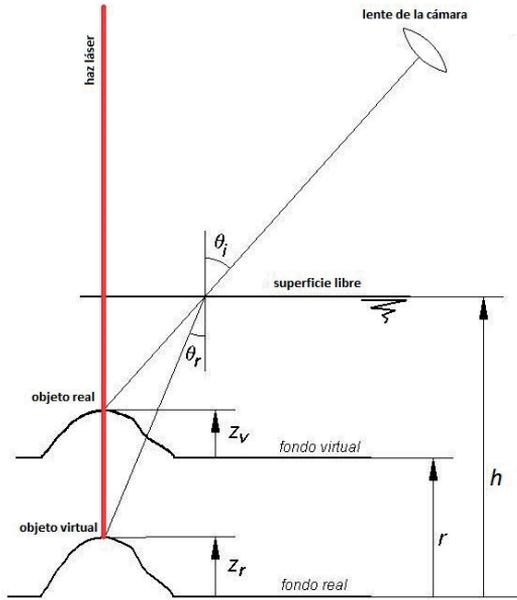


Figura 1.10. Disminución de la altura aparente de los objetos debido a la refracción.

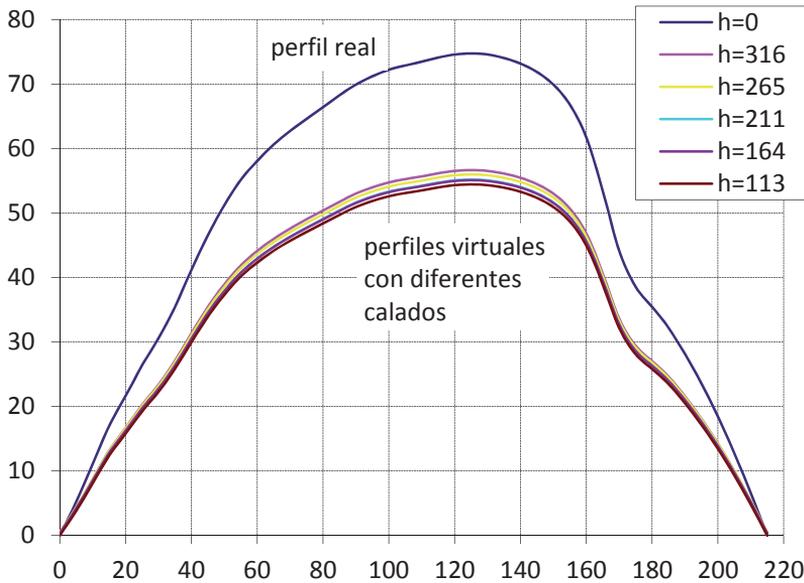


Figura 1.11. Perfiles real y virtuales medidos en mm para diferentes calados (h , mm).

A continuación se ha extendido el análisis a toda la línea proyectada por el láser, considerando en este caso la refracción en ambos planos, tanto desde un punto de vista teórico como experimental.

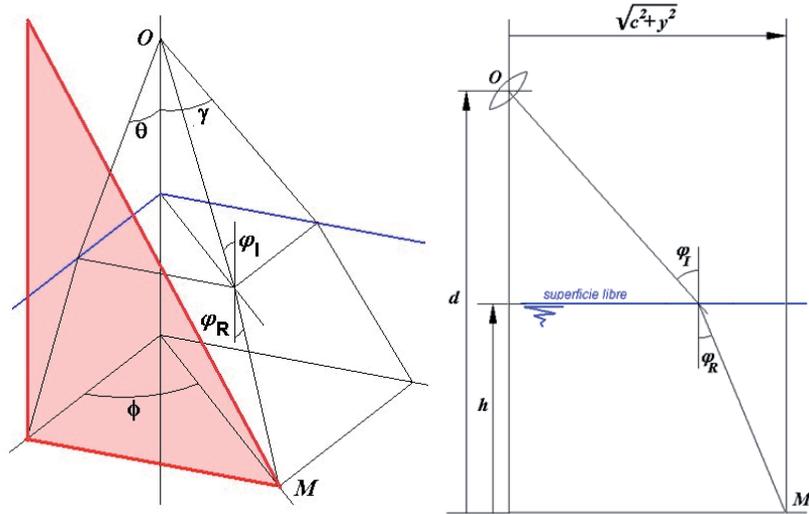


Figura 1.12. Desviación de las medidas por refracción en tres dimensiones

Los puntos en el plano medio sufren la elevación y achatamiento vistos, y fuera de él las superficies planas como el fondo del canal se curvan hacia arriba, y en general los valores de z sufren una elevación cuadrática con la distancia al citado plano medio.

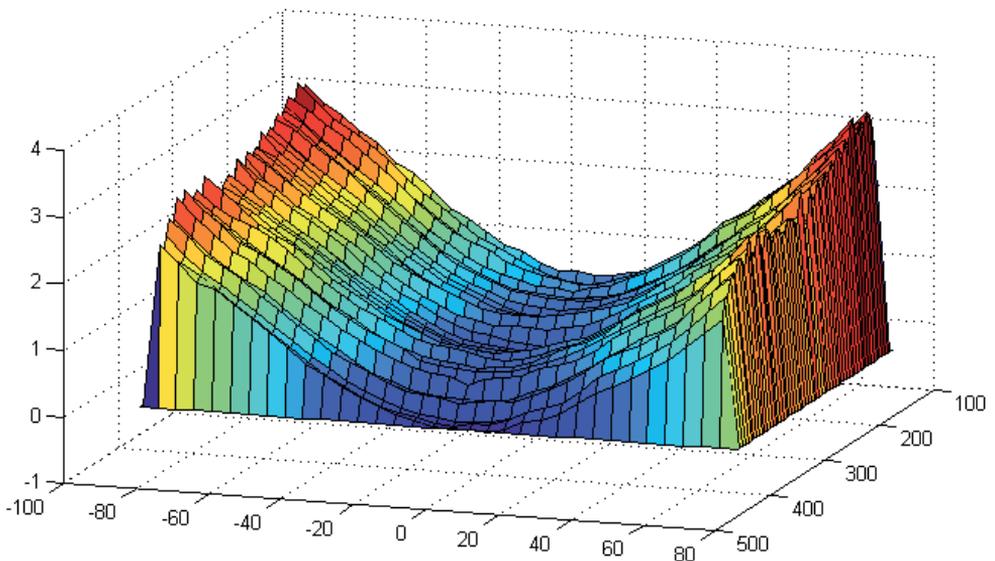


Figura 1.13. Curvatura hacia arriba del fondo plano del canal fuera del plano medio de simetría.

El hecho más remarcable es que la única coordenada que sufre una variación entre su posición real y la virtual observada por el escáner es la vertical, lo cual se puede demostrar de manera teórica y ha sido observado en un estudio experimental con un objeto patrón.

Como resumen pueden establecerse las siguientes conclusiones:

- a. Las coordenadas x e y no se ven afectadas por la refracción. La proyección vertical de los puntos observados en la superficie deformada y los reales coincide.
- b. La elevación de la línea media, que no se comba, puede aproximarse con suficiente precisión a una expresión lineal.
- c. La elevación de los perfiles transversales a esa línea media puede aproximarse con suficiente precisión a una parábola.

En ambos casos, la expresión ‘suficiente precisión’ se refiere a un error muy por debajo de la capacidad del escáner y de las necesidades experimentales.

La imagen obtenida por el escáner de una superficie puede de este modo corregirse para deshacer la transformación introducida por la refracción. Cada punto (x,y,z) de la superficie virtual observada tendrá su traslación en un punto de la superficie real. Tal y como se ha dicho, las coordenadas x e y no varían y la coordenada z podrá obtenerse con una expresión polinómica dada por

$$z = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} \cdot h - C_3 \cdot y^2 \quad [1]$$

Una vez conocida la forma de la transformación y calibrados los parámetros C_1 , C_2 y C_3 que la definen puede tomarse una imagen bajo el agua y corregir la distorsión para conocerla en verdadera magnitud.

El siguiente gráfico muestra la imagen de un fondo real de sedimentos de uno de los experimentos realizados. En la parte de arriba la superficie virtual observada por el escáner y debajo de ella la superficie corregida deshaciendo la transformación de la refracción.

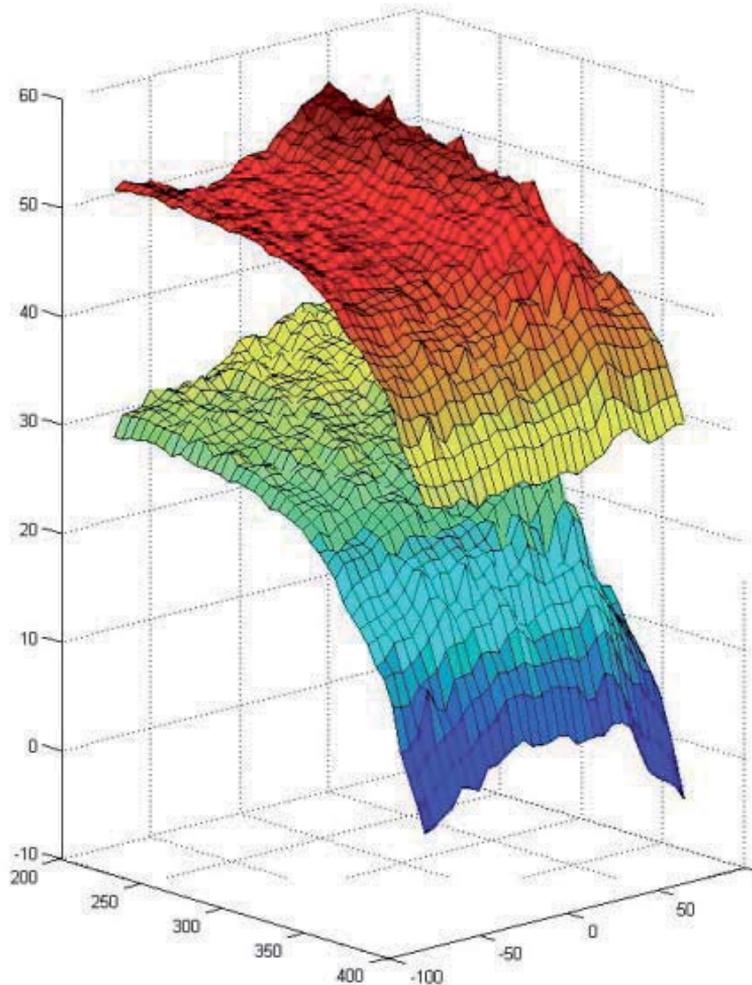


Figura 1.14. Superficies de un fondo de sedimentos: virtual –medida por el escáner- y real – una vez deshecha la transformación introducida por la refracción-.

Las limitaciones que presenta este sistema son las propias del equipo comercial usado, relativas a la dimensión del mayor objeto a digitalizar y la máxima distancia a la que puede situarse el escáner del objeto. Se trata por tanto de restricciones impuestas por el equipo y no del método empleado: un láser de mayor potencia o un sistema de posicionamiento diferente pueden salvar estos obstáculos.

El análisis de errores del método arrojó una precisión de medida de 0,7 milímetros, por debajo del tamaño del sedimento empleado.

1.4.2. Obtención de perfiles de sedimentos sumergidos en una imagen obtenida con un equipo PIV.

El escáner 3D citado en el punto anterior se empleó para una batería de experimentos de erosión para validar un modelo numérico de transporte. Durante la realización de los mismos se empleó simultáneamente un equipo de velocimetría de imagen de partículas (PIV) para la medida de velocidades y tensiones tangenciales. Observando las imágenes grabadas por éste mismo se vio la posibilidad de obtener de ellas el perfil del fondo iluminado por el plano láser.

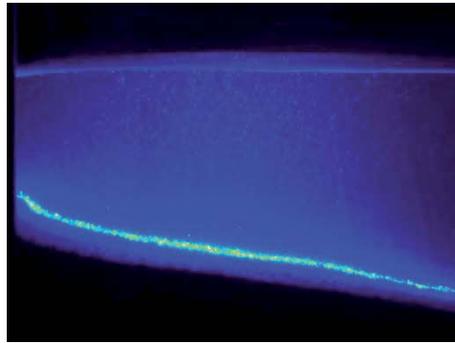


Figura 1.15. Imagen obtenida por un PIV en la que se observa el fondo de arena.

Para la extracción de estos perfiles de una imagen se desarrolló un algoritmo estadístico de comparación de patrones que se probó robusto frente al ruido y otros defectos de la imagen. Las imágenes obtenidas por la cámaras son matrices de filas y columnas de luminancia y representando las columnas puede verse el pico correspondiente a la línea de fondo aunque con un ruido de medida que obligó al desarrollo del citado algoritmo.

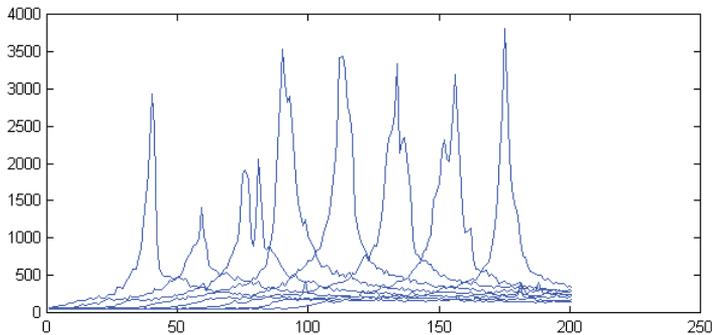


Figura 1.16. Valores de luminancia de diferentes columnas de la imagen PIV.

El equipo PIV empleado tiene su propio sistema de calibración –o mapeado- de coordenadas en píxeles en la imagen a coordenadas reales en milímetros en el plano de medida, que ha sido empleado para hacer esta transformación sin entrar en detalle en el mismo.



Figura 1.17. Calibración de píxeles a unidades físicas en una imagen PIV.

El análisis de los resultados de medida arrojó en este caso una precisión del orden de 0,15 milímetros para un área de 40 por 30 centímetros cuadrados.

Los resultados de la evolución en el tiempo del perfil obtenido por el escáner 3D se compararon con los obtenidos del análisis de las imágenes PIV pudiendo además obtener ventajas del uso conjunto y acoplado de ambas tecnologías: Los perfiles de fondo obtenidos por el PIV pueden ser empleados para el proceso de calibración 3D del escáner reduciendo el tiempo de puesta en marcha del equipo.



Figura 1.18. Uso acoplado del escáner 3D y el PIV en un estudio de erosión.

El uso acoplado de ambas herramientas simplifica la calibración del escáner y consigue vencer una buena parte de las limitaciones que tiene en su utilización por separado. Las medidas transversales del escáner complementan por tanto las del PIV, que son más precisas pero corresponden únicamente a un perfil.

1.4.3. Obtención de perfiles en imágenes tomadas con un equipo de bajo coste.

El tercer y último desarrollo de esta tesis doctoral tenía como objetivo obtener medidas de perfiles con un equipo de bajo coste constituido por:

- Un láser de nivelación de albañilería.



Figura 1.19. Láser de nivelación utilizado en albañilería.

- Una cámara digital comercial, capaz de tomar fotos y grabar video en alta definición.



Figura 1.20. Cámara digital de objetivos intercambiables.

Además de utilizar el método para obtener la posición del perfil en la imagen desarrollado para las imágenes del PIV, ha sido necesario establecer un procedimiento de calibración sencillo para obtener coordenadas reales. Este

procedimiento se basa en la localización en la imagen de una serie de puntos con posiciones conocidas en el plano de medida, correspondientes a marcas en una imagen patrón.

Esta calibración se ha realizado de dos maneras diferentes:

- De manera geométrica para obtener medidas semicuantitativas.
- De manera numérica para obtener medidas cuantitativas.

Para simplificar el procedimiento se ha recurrido a objetivos con distorsiones corregidas, que hacen que la transformación proyectiva entre el plano de medida y el de imagen sea bilineal con una función sencilla.

La calibración geométrica se ha hecho corrigiendo la distorsión de perspectiva con un programa de tratamiento de imágenes.

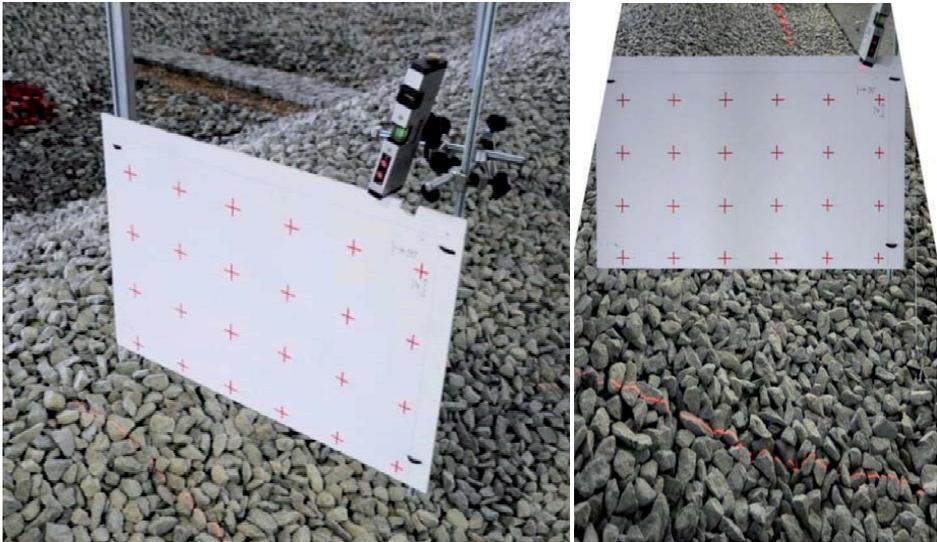


Figura 1.21. Deformación de la perspectiva en una imagen.

La superposición en la imagen con perspectiva corregida de una escala gráfica da como resultado la medida semicuantitativa buscada. Estas medidas corresponden al perfil de un dique de escollera sometido al oleaje y en donde sólo era necesario comparar los perfiles inicial y final para determinar si se había o no producido daño en el mismo.

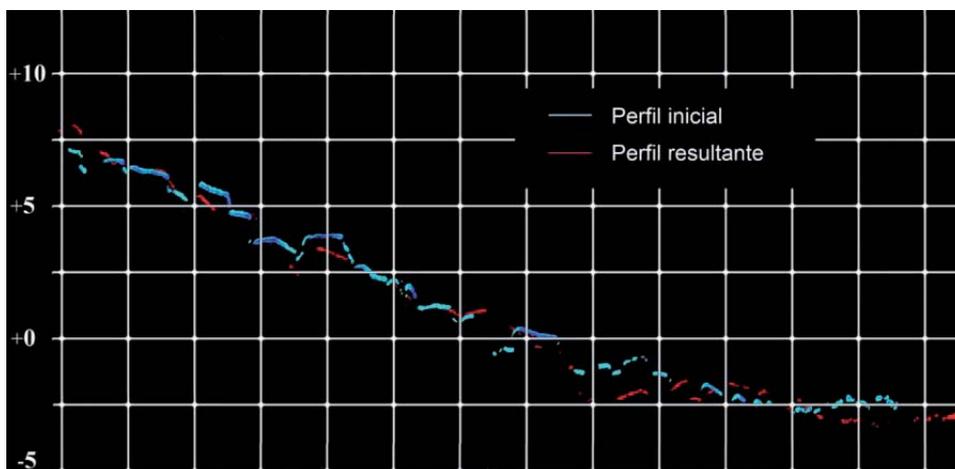


Figura 1.22. Perfiles transversales en un dique de escollera.

Sin embargo el método permite de igual modo la obtención de medidas cuantitativas con tal de conocer la posición física en el plano de medida y en píxeles del plano de imagen de cuatro marcas de calibración, de las cuales pueden obtenerse los coeficientes de la función bilineal de transformación.

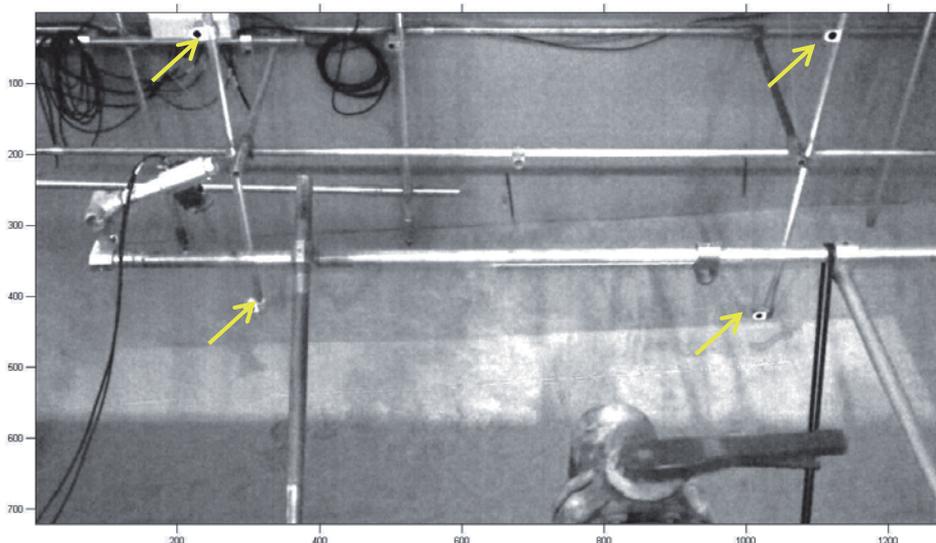


Figura 1.23. Imagen tomada con las marcas patrón de calibración.

Una vez obtenida la función y extraído el perfil se puede obtener el mismo en coordenadas físicas del modelo de laboratorio. Este último estudio se realizó para un proyecto de erosión costera dentro de la iniciativa Hydralab IV del VII Programa Marco de la Comisión Europea.

La zona de medida del perfil de playa está alternativamente emergida y sumergida según se suceden las olas. Estos fenómenos son denominados habitualmente con la terminología en inglés “run-up” y “run-down”, y la zona donde se desarrollan zona de “swash”. Fue necesario desarrollar un algoritmo para determinar de manera automatizada los momentos en el tiempo –run down- en los que es posible obtener un perfil al quedar la playa descubierta entre ola y ola. Para ello se determinaron todos los perfiles posibles cada 0,5 segundos en la grabación de video y se midió la diferencia media cuadrática entre ellos.

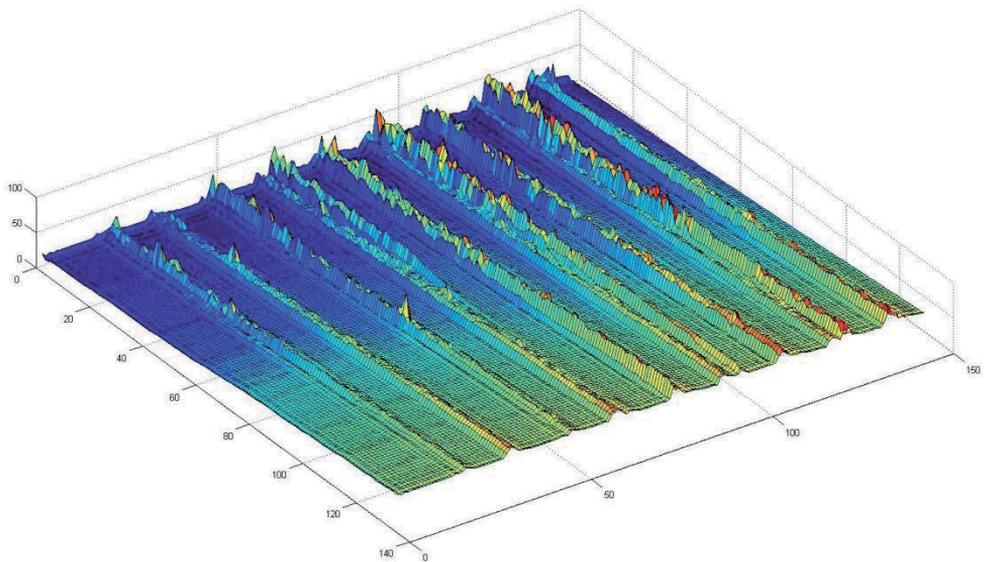


Figura 1.24. Perfiles obtenidos por el algoritmo de visión artificial. Las crestas identifican los eventos de oleaje.

El resultado final de las medidas es una colección de perfiles en el tiempo de los que es posible extraer la medida de erosión provocada por cada ola individual. En el gráfico que representa los perfiles de erosión son claramente visibles los fenómenos de erosión, acreción y modificación de la pendiente de la playa.

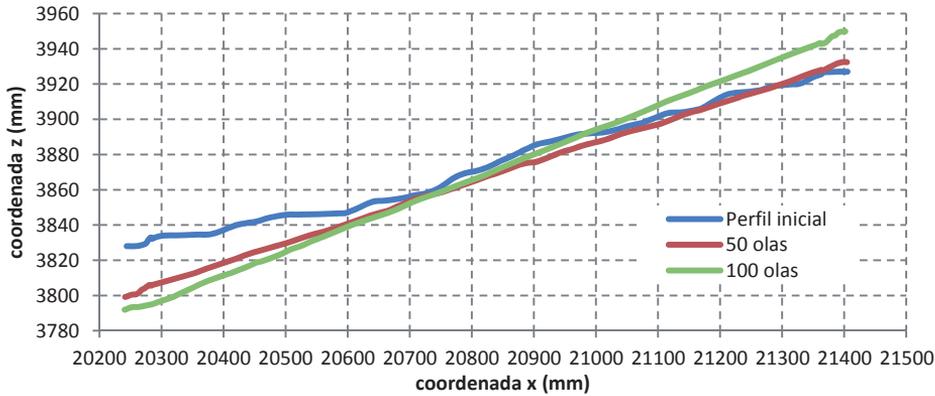


Figura 1.25. Evolución temporal del perfil de una playa de arena.

El análisis de errores de este método arrojó una precisión de 1 milímetro en un área de medida de 3 por 2 metros, muy superior a los métodos anteriores.

1.4.4. Conclusiones.

La primera conclusión de este trabajo es que se ha demostrado la posibilidad de obtener, con un escáner 3D, la evolución de un lecho de sedimentos bajo una lámina de agua en tiempo real. Esta medida además se puede realizar en régimen no permanente y de manera no intrusiva, constituyendo por tanto una herramienta extremadamente útil en el Laboratorio de Ingeniería Fluvial, cubriendo un campo de una manera novedosa y con muchas ventajas.

Para ello se ha probado que la transformación que introduce la refracción en el agua en las medidas del escáner puede ser revertida para tener la superficie real de un lecho erosionable. Esto permite medidas en unas condiciones donde otros instrumentos no pueden ser empleados por ser extremadamente intrusivos. Además su utilización en conjunto con un PIV arroja datos simultáneos de la tensión cortante y la evolución en el tiempo del fondo, muy valiosos para la validación de modelos numéricos o bien simplemente de expresiones de transporte de sedimentos.

La segunda conclusión, no menos importante, es que para obtener las medidas anteriores no son necesarios costosos equipos científicos sino que pueden realizarse de igual modo con equipos disponibles comercialmente fabricados para otro fin y de coste sensiblemente menor.

Se han probado equipos de bajo coste para la iluminación y toma de imágenes, y para convertirlos a uso científico se han estudiado y desarrollado las técnicas y algoritmos de visión artificial necesarios. Los procedimientos han tratado de diseñarse con el objetivo de ser rápidos, sencillos, robustos y en la medida de lo posible automatizados.

Para valorar los resultados obtenidos con un equipo de bajo coste puede analizarse la precisión de medida obtenida, del orden de una décima de milímetro en las medidas tomadas en un canal de experimentación hidrodinámica pequeño sobre un área de 40 por 30 centímetros cuadrados, y del orden de un milímetro en el caso de un canal de oleaje grande sobre un área de 3 por 2 metros cuadrados.

En el caso de las imágenes tomadas por el escáner comercial la resolución de la medida es de 0,7 milímetros, pero ésta es una limitación del propio equipo comercial adaptado y no del método por lo que puede ser mejorada con otro, y en cualquier caso supera a los instrumentos empleados tradicionalmente para esta tarea. La resolución de la medida es menor que el tamaño medio del sedimento empleado por lo que no es posible discernir si las variaciones son reales o ruido de medida.

En cualquier caso, y tal y como muestra la tabla 1.1, los sistemas presentados igualan la resolución vertical de otros sistemas más intrusivos y mejoran notablemente la resolución horizontal.

Tipo de sensor	Resolución vertical (mm)	Resolución horizontal (mm)
Puntual de conductividad	0,2	5
Puntual óptico	0,2	10
Puntual ultrasónico	0,1	10
Puntual de contacto	0,1	2
Escáner 3D	0,7	0,7
PIV	0,15	0,15
Equipo de bajo coste (área de 3x4 m²)	1	1
Equipo de bajo coste (área de 30x40 cm²)	0,1	0,1

Tabla 1.1. Comparación de sistemas de medida clásicos y los presentados en esta Tesis Doctoral (en negrita, todos los valores en milímetros).

La mejora en la resolución horizontal permite medir no solo la elevación del perfil, sino su forma en planta lo que es particularmente útil en el estudio de formas como las pequeñas ondulaciones del fondo o ripples.

La precisión obtenida por el equipo PIV y el de bajo coste aunque diferentes en valor absoluto son similares en términos relativos si se tiene en cuenta el campo de medida de uno y otro sistema, pudiendo conseguirse una resolución de 0,1mm con el equipo de bajo coste trabajando en un pequeño canal de laboratorio en un área de 30x40 cm².

Además de la elevada resolución espacial, las medidas no se limitan a un punto sino que se obtiene cada vez un perfil o una superficie completa. Esto permite medir con una resolución temporal elevada, de 4 medidas por segundo o superior, lo que abre la puerta al estudio de fenómenos transitorios. Esa es otra de las principales potencialidades de estas técnicas, que permite obtener información de mucha más calidad en el estudio de los fenómenos de erosión fluvial y costera.

Las técnicas y algoritmos desarrollados son válidas independientemente del equipo de grabación de imagen, por lo que pueden ser empleadas sin cambios con nuevas cámaras de mayor resolución o mayor frecuencia de adquisición de imágenes.

La principal limitación sin embargo de estas técnicas es el reducido poder de penetración del láser en aguas turbias, muy frecuentes en estos ensayos, así como la visibilidad de la línea proyectada por las cámaras. Es por ello que se limita a estudios con transporte de fondo y no en suspensión.

2. Estado del conocimiento

2. Estado del conocimiento

- 2.1. Introducción. Laboratorios de ingeniería fluvial y marítima.
 - 2.1.1. Introducción histórica.
 - 2.1.2. Modelos físicos en transporte de sedimentos.
 - 2.1.3. Instrumentación para estudios con fondo móvil.
 - 2.1.4. Medida de velocidades y tensiones tangenciales.
 - 2.1.5. Medida del transporte de fondo y en suspensión.
- 2.2. Medidas de fondos de sedimentos.
 - 2.2.1. Sedimentos sumergidos y emergidos. Medidas intrusivas.
 - 2.2.2. Medidas puntuales en una dimensión.
 - 2.2.3. Medidas en dos dimensiones basadas en video convencional.
 - 2.2.4. Medidas en dos y tres dimensiones basadas en imagen digital y luz estructurada.
- 2.3. Medida de superficies con un escáner de luz estructurada.
 - 2.3.1. Fotogrametría y visión artificial. Visión estereoscópica frente a luz estructurada.
 - 2.3.2. Luz estructurada. Iluminación convencional y láser. Refracción y dispersión cromática.
 - 2.3.3. Formación de la imagen. Lentes fotográficas: deformaciones cilíndricas y de perspectiva.
 - 2.3.4. Adquisición de imágenes. Sensores digitales y evolución en la última década.
 - 2.3.5. Mapeado de píxeles a coordenadas reales.
 - 2.3.6. Equipos comerciales y experimentales. Polhemus FastScan.
- 2.4. Tratamiento de imágenes.
 - 2.4.1. Ajuste y reconocimiento de patrones.
 - 2.4.2. Correlación cruzada en 1, 2 y 3 dimensiones.
 - 2.4.3. Correlación cruzada discreta.
 - 2.4.4. Obtención del pico de correlación. Interpolación subpíxel.

2.1. Introducción. Laboratorios de Ingeniería Fluvial y Marítima

2.1.1. Introducción histórica.

Una de las introducciones más completas que se ha encontrado durante la realización de este Estado del Conocimiento está en el libro de Modelos Físicos y Técnicas de Laboratorio en Ingeniería Costera de Steven A. Hughes (Hughes, 1993). Esta disciplina, la ingeniería costera, comparte muchos problemas -y metodologías para resolverlos- con la Ingeniería Fluvial, por cuanto los modelos de morfodinámica costera en muchos casos deben tener en cuenta la dinámica de los sedimentos.

Se podría considerar que el estudio en sentido científico de la hidrodinámica comienza con Leonardo da Vinci en el siglo XV. Da Vinci fue de los primeros en estudiar y representar diversos fenómenos de flujo a través de la observación visual durante algunos experimentos. Del mismo modo, el primer planteamiento teórico de los criterios de semejanza a escala se le atribuye a Isaac Newton (1642-1727).

Los primeros modelos hidráulicos a escala conocidos se deben al inglés John Smeaton, en 1752-53. Su objetivo era estudiar el rendimiento de molinos y norias de agua. Si bien no empleó relaciones matemáticas de escala, sí resaltó la importancia que tendrían. Jean-Baptiste Bélanger introdujo por primera vez en 1828 la relación de la velocidad de flujo y la raíz cuadrada de la aceleración de la gravedad multiplicada por la profundidad para los flujos en canal en lámina libre. Cuando la relación fue menor que la unidad, el flujo se comporta como un movimiento fluvial (es decir, el flujo subcrítico), y como un movimiento de flujo torrencial cuando la relación era mayor que la unidad (Chanson, 2009). En los años 70 del mismo siglo, Froude estableció relaciones a escala en la misma forma estudiando la estabilidad de barcos.

El primer estudio conocido de modelos con lecho erosionable se debe Louis J. Fargue en 1875. Fargue construyó una sección del río Garona a escala para demostrar la efectividad de las medidas de regulación propuestas por el mismo. En el modelo, las riberas eran fijas, mientras que el fondo era de arena suelta. En 1885 Osbourne Reynolds llevó a cabo experimentos con lecho erosionable del río Mersey empleando arena y su trabajo fue continuado por Vernon Harcourt, que

empleó materiales más ligeros y estableció las bases de la futura experimentación con lecho móvil.

Quizás la primera aproximación al problema de la observación de campos completos de flujo fluido fuese el experimento de Prandtl en 1904, quien dispuso de un canal horizontal para su uso a modo de túnel de viento, con una sección de ensayo y una sección de retorno con un molinete accionado a mano. En él introducía estructuras tales como cilindros, placas planas y hasta perfiles de ala para estudiar su comportamiento. Para la observación del flujo introducía partículas de mica negra en la superficie del agua.

A comienzos del siglo XX, el creciente número de problemas de regulación fluvial llevó al empleo cada vez mayor de modelos a escala reducida y al estudio de las condiciones de semejanza de los mismos con las leyes que darían paso poco después a la definición más formal del *análisis dimensional*.

Desde entonces hasta ahora la experimentación en laboratorio se ha extendido por todo el mundo, con cada vez más Universidades y otras instituciones creando laboratorios hidráulicos para la enseñanza y la investigación, especialmente con posterioridad a la Segunda Guerra Mundial. El progreso en la experimentación ha hecho que los modelos físicos a escala sean en la actualidad utilizados como herramientas de diseño en la gran mayoría de grandes proyectos de hidráulica fluvial.

Tal y como se planteó en la introducción, el flujo en los ríos implica a dos actores fundamentales, el agua y los sedimentos. La medición de parámetros en el estudio de modelos físicos en lo que respecta al agua está muy asentada con una larga tradición. En particular y en relación con la medida de campos de velocidades, una nueva generación de instrumentación acústica doppler y láser ha revolucionado con sus capacidades el trabajo en los laboratorios.

La Comisión Europea ha promocionado a través de las iniciativas Hydralab (I, II, III y recientemente IV, Frostick, 2011) el uso de modelos a escala, particularmente enfocado a la Ingeniería Hidráulica, y el estudio de la posibilidad (o imposibilidad) de estudiar esos modelos en laboratorio y las oportunidades de posibles sinergias con modelos matemáticos con tres objetivos fundamentales:

- Disponer de un inventario de instalaciones disponibles.

- Fomentar el intercambio de información entre laboratorios, y el desarrollo conjunto de recomendaciones de trabajo y guías de buenas prácticas.
- Determinar la necesidad y procurar el desarrollo de nuevas técnicas de medición experimental.

2.1.2. Modelos físicos en transporte de sedimentos.

Los términos ‘modelo físico’, ‘modelo reducido’, o ‘modelo hidráulico’ se definen de muy diferentes modos según las diferentes aproximaciones al problema de reproducir las condiciones de un problema hidráulico concreto. Una muy genérica (Hughes, 1993) es la siguiente

Un modelo físico es un sistema físico reproducido (normalmente en tamaño reducido) de modo que las fuerzas dominantes actuantes sobre el sistema están representadas en la correcta proporción respecto del sistema físico real.

Es importante remarcar también (Yalin, 1971) la importancia del correcto diseño del modelo para predecir el comportamiento de un fenómeno físico. Si el diseño no es correcto, el modelo es erróneo desde el principio y la instrumentación más sofisticada sólo sirve para medir con precisión predicciones erradas. La expresión en inglés más empleada para expresar este principio es ‘garbage in garbage out’.

Las ventajas del trabajo en modelo reducido (Darlymple, 1985) son varias, siendo las más importantes las siguientes

- Los modelos físicos reproducen las condiciones que gobiernan los procesos sin las simplificaciones que se realizan en los modelos matemáticos para poder resolverlos. Esto es más importante en los estudios de fenómenos relacionados con la turbulencia.
- El tamaño reducido permite la toma de datos a menor coste que el trabajo en el prototipo o modelo real, en particular en lo que se refiere a la medida simultánea de campos de parámetros. El grado de control sobre el experimento permite además la simulación de condiciones extremas. La visualización directa de los fenómenos ofrece una impresión directa de lo que sucederá, estimulando la creatividad y la búsqueda de soluciones más allá de la teoría o los cálculos matemáticos.

- El avance de las tecnologías de medida de parámetros hidrodinámicos como la velocimetría de imagen de partículas ha permitido conocer las propiedades del flujo hasta extremos antes desconocidos. Asimismo, la potencia de los ordenadores ha permitido la adquisición y el proceso de cantidades de datos antes impensables.

Los modelos físicos para transporte de sedimentos deben reproducir de manera adecuada el comportamiento de los mismos. Al igual que sucede con la hidrodinámica, será necesario establecer cuáles son las fuerzas que dominan de entre las implicadas (fricción con el agua, cohesión entre partículas, gravedad...) para su representación a escala, y esto no siempre será posible. La representación en modelo de un fenómeno dependerá fundamentalmente de la fórmula que reproduce adecuadamente su comportamiento en el escenario modelizado (Soulsby, 2008).

Los materiales de que están hechos los lechos de los ríos, estuarios y playas provienen de la meteorización de las rocas en tierra firme, y tienen muy diferentes granulometrías, texturas en su microestructura y como agregados, y propiedades físico-químicas como la cohesión. El parámetro más importante para su caracterización es el diámetro medio, d_{50} . Otros percentiles de las curvas de granulometría como el d_{90} son empleados en ocasiones.

La movilización de sedimentos tiene dos mecanismos fundamentales: transporte de fondo y en suspensión (Chanson, 1999, Vanoni, 2006). En los modelos a escala no podrán reproducirse simultáneamente y de manera fiel ambos fenómenos porque las fuerzas que dominan uno y otro son diferentes por lo que se deberá conocer previamente cuál es el que domina para elegirlo sobre el otro, y deberá estudiarse el orden de magnitud del error al que se llega por esta elección.

En los procesos que tienen lugar en la zona a de rotura de oleaje de playas y estuarios, el proceso a reproducir a escala de manera precisa es la trayectoria de caída de los sedimentos. Conseguir escalar las velocidades de sedimentación es complejo por cuanto el tamaño de sedimento adecuado puede llevar a uno cohesivo. La solución a este problema es la utilización de sedimentos artificiales de baja densidad o la exageración de la escala vertical en un modelo distorsionado (Hughes, 1997).

La modelización a escala de las granulometrías, la textura del fondo y los antecedentes y condiciones de contorno espaciales (río arriba o corriente arriba) y temporales (con posibles procesos de armadura del fondo) de la parte de la realidad que se pretende modelizar son temas muy complejos de tratar y que se salen del ámbito de esta tesis por lo que no serán tratados aquí.

La medida de fenómenos de transporte de sedimentos se puede dividir por un lado en las procesos, es decir los diferentes modos de transporte y por otro en sus consecuencias, la modificación de la morfología del fondo.

- Medida del transporte en suspensión
- Medida del transporte de fondo
- Medida de la morfología de lechos y estructuras (topografía, rugosidad)

Es la última en la que se inscribe esta tesis doctoral. Para la modelización y medida de los fenómenos de transporte serán necesarios detallados análisis dimensionales de los procesos, pero no así para la medida de la morfología de los lechos en las que intervienen parámetros estrictamente geométricos. Es por ellos que a lo largo de esta tesis doctoral no se hará referencia a modelos de semejanza más allá de esta introducción.

2.1.3. Instrumentación en el laboratorio hidráulico para estudios con fondos o estructuras móviles.

Si bien el objetivo de este proyecto es el desarrollo de herramientas para la medición de la topografía de fondos móviles de sedimentos –sumergidos, emergidos y temporalmente emergidos- y de estructuras hidráulicas, la instrumentación para la medida de parámetros hidrodinámicos no puede ser separada de éstas por cuanto su acción puede ser sinérgica -y obtenerse información de ambos medios simultáneamente con un mismo equipo-, o bien de interferencia mutua. En los experimentos de laboratorio es habitual la presencia de varios tipos de equipos de medida por lo que se hará una descripción breve de otros posibles equipos implicados en ellos.

Es por ello que se hará una introducción breve a los principales equipos para medición de parámetros hidrodinámicos utilizados en un laboratorio moderno. Por

el contrario, la instrumentación utilizada habitualmente para la medida de oleaje en los laboratorios de Ingeniería Marítima se sitúa en las proximidades de la superficie libre y en general no interactúa ni tiene una relación directa con el problema de medidas en el fondo por lo que no será tratada en este Estado del Conocimiento.

Aparte de la medida hidrodinámicas de velocidades, calados, caudales y tensiones tangenciales, la medida de fenómenos de transporte de sedimentos se puede dividir por un lado en los procesos, es decir los diferentes modos de transporte y por otro en sus consecuencias, la modificación de la morfología del fondo.

Tal y como se ha dicho, la medida del resto de parámetros puede ser sinérgica obteniendo resultados redundantes y también pueden producirse fenómenos de interferencia mutua.

Un buen ejemplo de esto es el proyecto CoSSeDM del que se hablará en el capítulo 5, en el que más de 50 instrumentos estaban situados en un área de estudio relativamente pequeña. El inicio del acrónimo corresponde a Coupled, se trata de medidas acopladas, algo necesario para tratar de entender el fenómeno en su conjunto.

2.1.4. Medida de velocidades y tensiones tangenciales.

La medida de las velocidades de un flujo es, junto con los niveles de agua – estáticos o en forma de ondas-, uno de los parámetros hidrométricos más importantes para los estudios de hidráulica fluvial y marítima. En flujos en lámina libre se han desarrollado numerosos aparatos que permiten medir la velocidad en un punto, una línea, un plano o un volumen del campo fluido.

La elección de la instrumentación viene condicionada por la precisión requerida en el estudio, disponibilidad o familiaridad con el manejo de la instrumentación, presupuesto, grado de intrusión del instrumento en el flujo a estudiar, etc. Para el estudio de fenómenos de campo y en algunos estudios de laboratorio se utilizan habitualmente una serie de equipos que en modelos de escala reducida son imprescindibles por la interferencia sobre los flujos de agua y sedimentos como son molinetes mecánicos (WMO, 2008) y electromagnéticos (Valeport, 2011), y por ese motivo no se tratarán aquí.

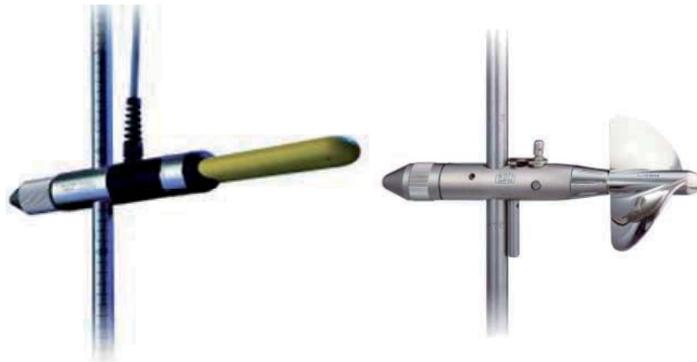


Figura 2.1. Velocímetros de molinete y electromagnético.

De entre toda la instrumentación disponible para el estudio de fenómenos hidráulicos con lecho móvil los más interesantes son si duda tres tipos fundamentales:

- Velocímetros acústicos doppler (ADV).
- Currentímetros o perfiladores acústicos doppler (ADP, ADCP o UVP).
- Velocímetros de imagen de partículas.

Eso equipos pueden, respectivamente, tomar medidas en un punto (ADV), una línea (ADCP) o bien en un plano o un volumen (PIV). Todos ellos son además capaces de caracterizar las tres componentes de la velocidad en el espacio al contrario de lo que sucede con molinetes (clásicos o electromagnéticos).

El principio de funcionamiento de los velocímetros y currentímetros doppler acústicos está basado en la reflexión de un haz de ondas de presión (acústico ultrasónico) en las partículas presentes en suspensión en el agua.

En el caso de los ADV (Lohrmann et al, 1994), la sonda emite pulsos y recibe un eco correspondiente a una distancia del emisor (volumen de muestreo). La diferencia de frecuencia las ondas emitidas y recibidas –desviación doppler- está relacionada en proporción lineal con la velocidad. Por tanto, una de las hipótesis fundamentales de este tipo de instrumentación es asumir que el agua cuenta con partículas en suspensión y que éstas se mueven con la misma velocidad que el agua. Con un emisor y tres receptores pueden obtenerse las tres componentes de la velocidad en un punto.



Figura 2.2. Velocímetro acústico doppler.

Su principal ventaja es esa, la obtención simultánea de las tres componentes de la velocidad, incluso en condiciones de turbidez muy elevada y su principal problema de nuevo es que se trata de equipos relativamente intrusivos a pequeña escala.

Este mismo principio de funcionamiento permite a los perfiladores –ADP ó ACDP- obtener información de varios volúmenes de muestreo –celdas- a lo largo de una columna alineada con el emisor del haz (Emery, 2001). Inicialmente estos equipos se desarrollaron para trabajo de campo en el mar y en río a grandes profundidades pero algunos diseños recientes han conseguido una miniaturización que los hace útiles en el laboratorio para modelos reducidos.



Figura 2.3. Perfilador acústico doppler.

Las implementaciones más modernas de este principio de medida como el DOP2000/3000 de Signal Processing Inc. (Willemetz, 1987) han conseguido reducir el tamaño de los palpadores haciendo posible su uso a pequeña escala en modelos reducidos (Adduce, 2004; Messer, 2005).

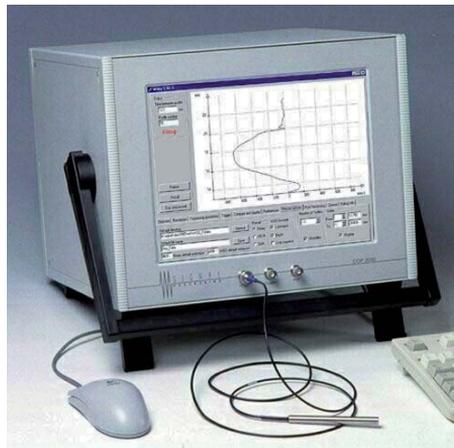


Figura 2.4. Perfilador acústico en miniatura DOP2000.

Aunque están en fase experimental y no exentos de problemas, la principal atracción de estos modelos es que la obtención de un perfil de velocidades en lugar de un único punto permite estimar la tensión tangencial.

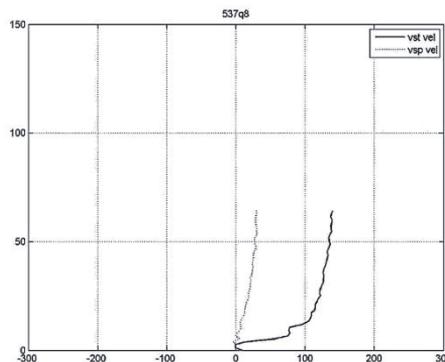


Figura 2.5. Perfil de velocidades obtenido por un DOP2000.

Como valor añadido, ambos equipos –ADV y ADCP– obtienen por eco acústico la posición del fondo de sedimentos, aunque únicamente en un punto.

Sin embargo probablemente el complemento ideal para los estudios en lecho erosionable es el velocímetro de imagen de partículas (Raffel, 1998), fundamentalmente por su poder resolutorio en la capa límite que posibilita el estudio de la tensión tangencial.

El principio básico de medida de un PIV es tan sencillo como tomar dos imágenes, separadas por un determinado intervalo de tiempo, del movimiento de las partículas trazadoras que acompañan el flujo del fluido y son iluminadas por el láser.

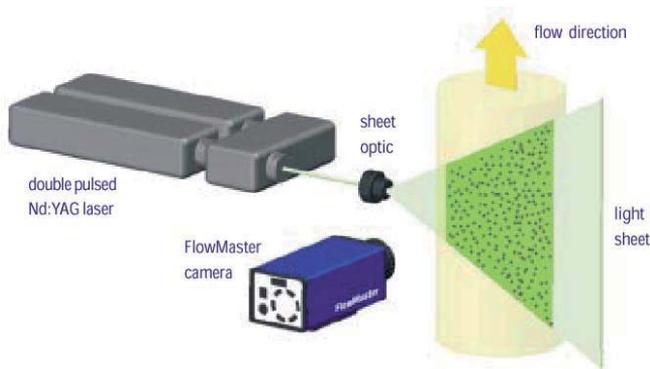


Figura 2.6. Principio de funcionamiento de un velocímetro de imagen de partículas.

Estas dos imágenes se dividirán en pequeñas ventanas y se estudiará la coincidencia –*correlación* en términos estadísticos- de ambas, para así establecer, en un plano en dos dimensiones, la ecuación clásica de velocidad igual a *espacio dividido por tiempo*.

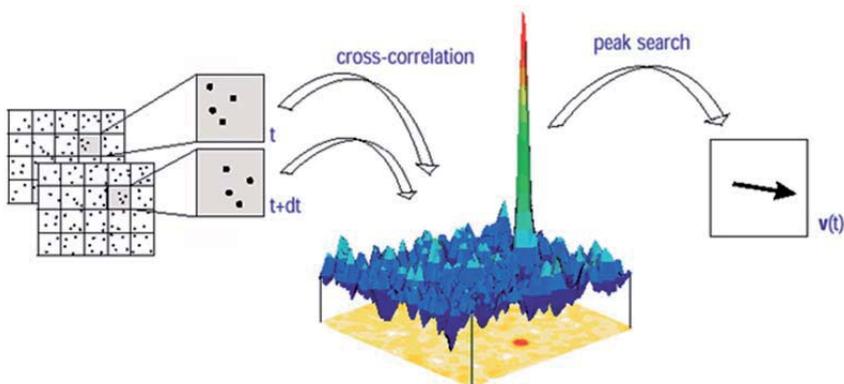


Figura 2.7. Principio estadístico de correlación utilizado en la técnica PIV.

Sin embargo esta idea tan simple requiere en casi todas las etapas del sistema tecnologías muy avanzadas y que, por su influencia en el resultado de la medida, es necesario conocer para un uso correcto del equipo.

La técnica PIV se ha convertido en los últimos tiempos en una poderosísima herramienta para el estudio de campos de velocidades en el seno de un fluido en movimiento, ya sea este en régimen estacionario o no, particularmente desde la introducción de la fotografía digital (Willert, 1991). Después de 20 años de desarrollo, hay poco que decir sobre sus asombrosas capacidades (Adrian RJ, 2005). En algunos campos como la aerodinámica y cada vez más en hidráulica, su uso se ha convertido en casi imprescindible para determinados problemas que antes no se podían abordar desde un punto de vista experimental. Las ventajas que ofrece frente a la hidrometría clásica basada en equipos tradicionales como molinetes u otros más avanzados como los velocímetros doppler de ultrasonidos, son fundamentalmente dos:

- Se trata de técnicas no intrusivas, lo que se hace particularmente importante en problemas donde el espacio es limitado y los instrumentos clásicos ocupan dimensiones excesivas en proporción al ámbito de estudio.
- Se trata de técnicas que permiten obtener todo el campo de velocidades en un plano (o incluso en varios planos) para un mismo instante.

La segunda ventaja es quizás la más importante. La posibilidad de obtener todo el campo de velocidades simultáneamente es fundamental, no tanto en cuanto ahorra tiempo de estudio, como por la oportunidad que ofrece de estudiar problemas en régimen no estacionario que antes no existía.

Algunas técnicas mejoradas de toma de imágenes y procesado de datos PIV han ido precisamente en esa dirección: estudiar en detalle la capa límite viscosa y la tensión tangencial (Ahmed, 2001).

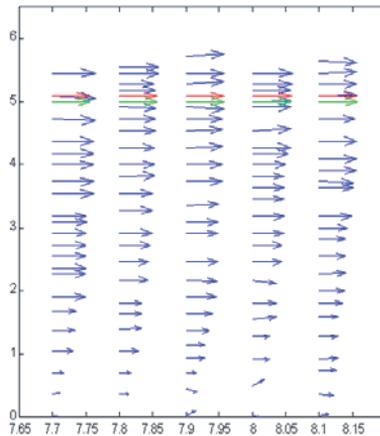


Figura 2.8. Perfil de velocidades en la capa límite obtenido por un PIV (Peña 2002a).

Además de obtener la tensión tangencial a partir de perfiles de velocidades, existen también equipos para su medición directa (Barnes et al, 2009) mediante el uso de una placa –shear plate- situada en el fondo que mide la fricción que produce el fluido sobre ella como un esfuerzo mecánico. Sin embargo estos equipos no pueden ser empleados en estudios de lecho móvil puesto que al producirse erosión o acreción en la zona donde están situados ya no se encuentran alineados con la superficie del fondo.

2.1.5. Medida del transporte de fondo y en suspensión.

La medida en campo de transporte de fondo y en suspensión puede realizarse en estudios de campo mediante la toma de muestras de agua o bien utilizando diversos aparatos capaces de atrapar sedimentos en una red, pero estas técnicas no tienen sentido en laboratorio a pequeña escala.

En laboratorio el método más habitual para el estudio del **transporte en suspensión** relaciona la concentración de partículas con con la turbidez el agua, utilizando para medir éstas técnicas de reflexión difusa radiación infrarroja o eco acústico.

Los equipos de infrarrojos, denominados genéricamente OBS (optical backscatter point sensor), detectan la turbidez del agua en base a la reflexión difusa de radiación en la materia en suspensión del agua (Downing, 2006). Constan de un emisor y un receptor y no se ven afectados por la radiación infrarroja de otras fuentes al ser ésta atenuada fuertemente incluso en agua clara. Es por esto mismo

que se trata de una medida puntual correspondiente al entorno más cercano al sensor.

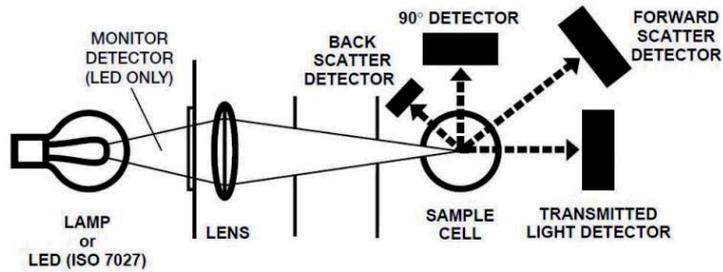


Figura 2.9. Sensor de turbidez de infrarrojos.

Si bien se trata de equipos robustos y de utilización muy sencilla, el principal problema a la hora de emplearlos para medir la presencia de sedimentos en suspensión es relacionar la concentración de los mismos con la turbidez. La respuesta del sensor depende no solo de la cantidad de partículas en suspensión sino de su tamaño siendo necesaria la realización de pruebas de calibración con el sedimento particular presente en la zona de medida (Battisto, 1999).

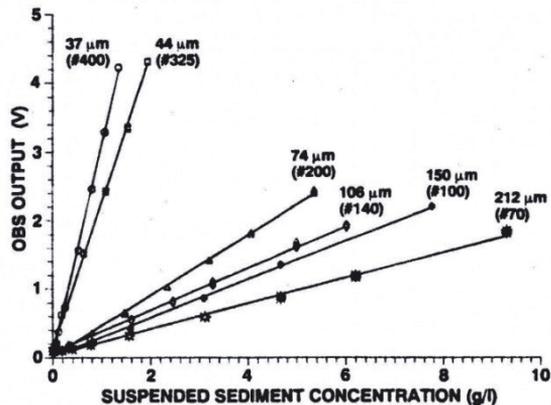


Figura 2.10. Variación de la medida de turbidez con el tamaño del sedimento (Battisto 1999).

La presencia de partículas en suspensión puede verse también en la respuesta de los equipos acústicos similares en sus sensores a los ADV y ADCP denominados en inglés ABS (acoustic backscatter profiling sensors). Su principio de funcionamiento es similar a los anteriores pero en este caso se emite un pulso acústico en lugar de un haz infrarrojo y se mide de igual modo la reflexión difusa del mismo producida

por las partículas (Thorne y Hanes, 2002). La principal ventaja es el mayor poder de penetración de las ondas acústicas lo que permite que pueda situarse más lejos del fondo y considerarse menos intrusivo.

La medida del **transporte de fondo** inicialmente se hacía mediante la observación directa del inicio y continuación de movimiento de las diferentes granulometrías adecuadamente cribadas. Sin embargo el hecho es que su comportamiento cuando están mezcladas, tal y como sucede en la realidad, no queda adecuadamente modelizado de este modo.

Los equipos más empleados para el estudio del transporte de fondo están basado en la conductividad eléctrica (CCM, conductivity concentration measurement) y su variación con la presencia de sedimentos en la capa inmediatamente pegada al fondo donde se produce este transporte (sheet flow; Ribberink, 1995). Estos equipos cuentan con una o más sondas que emergen desde el fondo se sedimentos donde es encuentra enterrada una base soporte con forma de tanque.

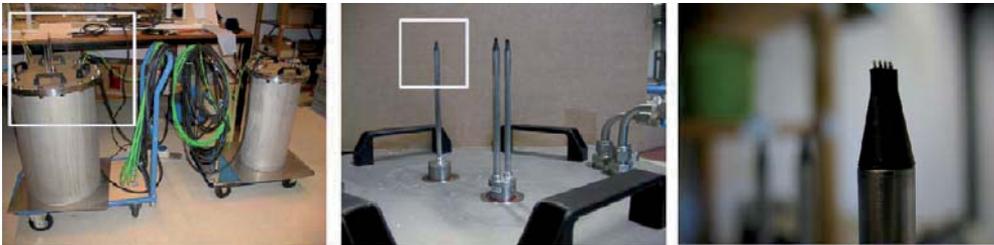


Figura 2.11. Tanque para la medida de concentración a través de la conductividad.

Un problema frecuente es que el nivel del fondo no es estable y la posición de las sondas debe reajustarse de manera continua si bien los modelos más recientes pueden hacer esto de manera automática. El equipo relaciona las medidas de conductividad de las diferentes sondas obteniendo la concentración de partículas, su velocidad y la posición de la capa de movimiento, que puede relacionarse con la posición del fondo.

2.2. Instrumentos para la medida de lechos de sedimentos.

2.2.1. Sedimentos sumergidos y emergidos. Medidas intrusivas.

Los modelos hidráulicos de laboratorio en lecho móvil, desde procesos de erosión y sedimentación en ríos hasta la acción de las olas en las playas, tienen en común la necesidad de medir la topografía de lechos de sedimentos y su evolución en el tiempo, siendo un problema común a los laboratorios de hidráulica fluvial y costera. La principal dificultad con la que deben lidiar todas las técnicas empleadas es la modificación de los experimentos por los propios equipos o métodos de muy diversas maneras. Las medidas se hacen principalmente de tres maneras:

- Con el experimento finalizado y una vez retirada el agua sobre los sedimentos.
- Con el experimento parado en lo que se refiere a la hidrodinámica pero el equipamiento (canal, tanque) aún lleno de agua.
- Con el experimento en marcha y las condiciones hidráulicas existentes en el mismo.

El primer método es el más sencillo pero probablemente es el más intrusivo en el caso de lechos de sedimentos. Cuando se vacía el canal o tanque de experimentación el agua al retirarse modifica la topografía. En el caso de perfiles de playa en ocasiones lo que se hace es lo contrario, en lugar de vaciar el canal de ensayo se inunda toda la zona de playa para que toda la zona de medida esté completamente bajo el agua. Tal y como es verá muchos métodos tienen problemas para trabajar en las zonas parcialmente emergidas. Aunque no tenga que ver con el tema central de esta tesis, en los ejemplos de aplicación se verá que este sin embargo es un método válido para el caso de estructuras marinas como diques de escollera.

El segundo método es menos intrusivo pero no todos los canales de experimentación hidráulica lo permiten. El diseño clásico de tanque de nivel constante elevado y canal con vertido por el extremo final no permite parar el experimento y mantener el nivel de agua.

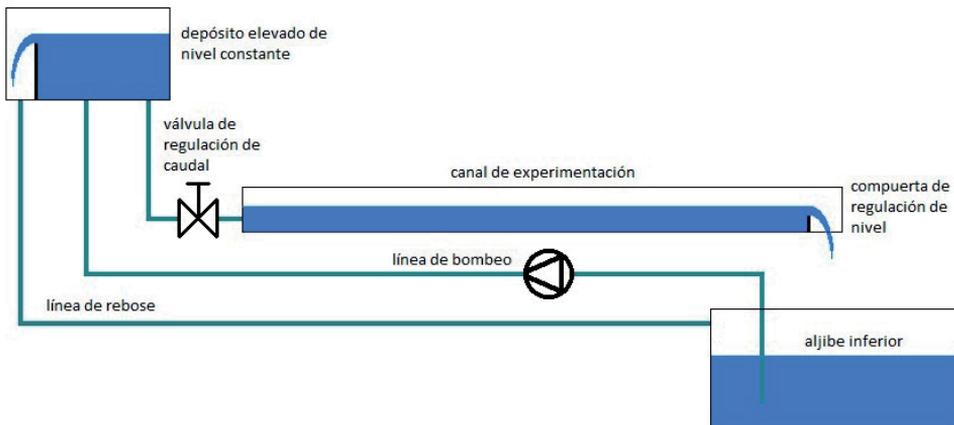


Figura 2.12. Diseño de canal con depósito elevado y salida por vertedero.

Esto en cambio si es posible en el caso de canales de oleaje y algunos diseños particulares de canales de corriente y ola-corriente, en donde el nivel de agua permanece constante cuando se paran los equipos de bombeo.

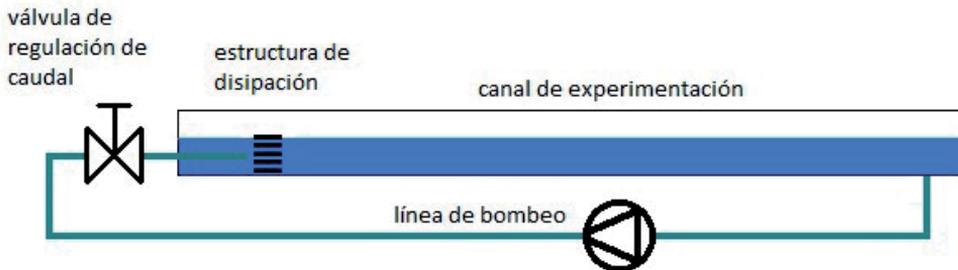


Figura 2.13. Diseño de canal con bombeo continuo.

La tercera opción de hacer medidas con el experimento en marcha es sin duda la más conveniente pero tiene como principal problema que en la mayor parte de métodos clásicos de medida se introduce en el agua algún tipo de sonda. Las trayectorias del agua se ven modificadas por la presencia de la sonda y cuando se encuentra cerca del fondo se producen fenómenos de erosión local.

Es para salvar todos estos problemas que en los últimos años se han venido desarrollando diferentes métodos de medida basados en diferentes técnicas de imagen digital (fija o video). Estas técnicas sin embargo –y este es su principal inconveniente- chocan frontalmente con la turbidez del agua en el caso de modelos con mucho transporte en suspensión por lo que para algunos

experimentos de transporte de fondo se emplean sedimentos de tamaño medio lavados para eliminar los finos.

La medida de lechos de sedimentos temporalmente sumergidos tal y como se produce en la zona que cubren y descubren alternativamente las olas en una playa (zona de swash) es también de particular interés en los laboratorios de hidráulica costera por los procesos erosivos y acretivos que se producen en ella. El hecho de estar temporalmente emergidos hace que sea posible aprovechar esos momentos para tomar una medida completa del perfil o la superficie de sedimentos pero la necesidad de hacerlo en un tiempo muy escaso hace que la medida se complique en gran manera con respecto a una situación estática.

De entre los equipos que se utilizan habitualmente para estas medidas podemos hacer dos grandes grupos, aquellos que toman medidas en un único punto – habitualmente en una línea vertical- y aquellos que toman medidas de perfiles en 2D y superficies en 3D.

Con los instrumentos puntuales pueden hacerse medidas en 2D y 3D por medio de algún sistema que los desplace de manera automatizada o bien disponiendo líneas o matrices de sondas, pero en cualquier caso se estudiarán por separado. En el caso de sensores móviles debe garantizarse una situación de medida cuasiestática en la que el tiempo para tomar una medida completa debe ser menor al menos en un orden de magnitud que el tiempo característico de variación del perfil medido.

2.2.2. Medidas puntuales en una dimensión.

Ian E Shepperd (1996) hizo un análisis de las técnicas disponibles centrándose en las principales en uso en el momento –puntuales- con sus ventajas e inconvenientes. Desde la publicación del artículo en 1996 ha habido algunas mejoras en la resolución de los equipos de ultrasonidos y muchos avances en la medida basada en imagen digital, pero para los equipos clásicos que toman medidas puntuales los resultados de su análisis siguen siendo básicamente válidos.

En algunos casos la medida que toman estas sondas es algún tipo de promedio de un área más o menos reducida y no una medida puntual, lo que limita su resolución horizontal y su capacidad para el estudio de microestructuras en la topografía del fondo.

La tabla siguiente extraída de la citada referencia muestra los métodos más comunes y sus capacidades.

Sensor Method	Use in Air	Use Under Water	Typical min. depth mm	Use in Air-Water Transition	Typical horizontal resolution at the bed mm	Typical vertical resolution mm
Conductivity	X	✓	20	X	5	0.2
Optical retro-reflective	✓	✓	10	X	10	0.2
Ultrasonic	✓	✓	100	X	20	1
Laser distance sensor	✓	✓	60	X	2	<0.1
Touch Sensitive	✓	✓	Zero	✓	2	0.1
Remote photographic	✓	X	(Surface reflection)	X	?	?
Image analysis	✓	?	?	?	?	?

Tabla 2.1. Comparativa de diferentes métodos para medir un fondo de sedimentos (Shepperd, 1996).

Otra revisión menos exhaustiva puede encontrarse en el inventario de instrumentos de medida de fondos de la red Hydralab disponible en su página web (<http://www.hydralab.eu/Epool.asp>), en donde puede verse que los instrumentos tradicionales están dejando paso a los sistemas ópticos y láser.

AQUAscat 1000 - Acoustic Backscatter Systems (ABS)	Suspended sediment concentrations and bed level
AccuRange 200 Displacement Sensor	Bed Surface Elevation
Leica ScanStation	Bed Morphology
Advanced Optic Probe	Bed Shape Mapping
Acoustic Backscatter Sensors (ABS)	Suspended Sediment Profiles, Bed Level
Twente 'buried' measuring tank	Bed Level, Sediment Concentrations/Velocities
Trimble GS200 Laser Scanner	Bed Morphology

Tabla 2.2. Inventario de instrumentos para medir fondos de sedimentos de Hydralab.

Los métodos basados en la conductividad han sido empleados desde hace muchos años (Wilkie, 1954) y tienen dos implementaciones diferentes, ambas válidas únicamente bajo una lámina de agua:

- Una sonda con forma de varilla mide la conductividad en el entorno de su punta. La presencia de sedimentos no conductivos hace variar este valor y de ese modo la sonda detecta la presencia del fondo (Deltares, 2008). Debe ser introducida hasta una distancia muy próxima al fondo por lo que puede provocar una erosión local en su entorno.

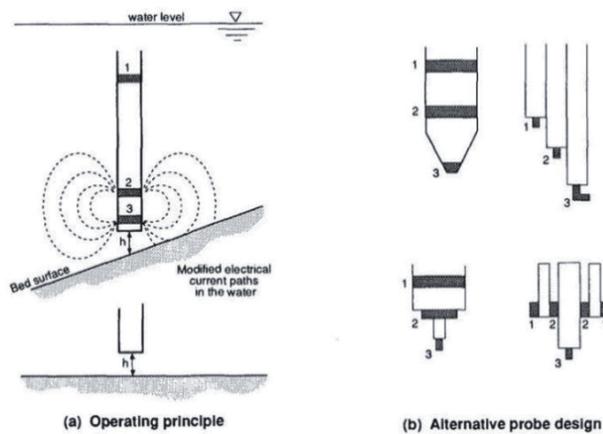


Figura 2.14. Sondas de conductividad para detectar la presencia del fondo.

- Un grupo de sondas se sitúa bajo la capa de sedimentos y otra común cierra el circuito eléctrico sobre el agua (de Rooij, 1999). El espesor de la capa de sedimentos sobre las sondas enterradas modifica la conductividad medida entre ellas y el electrodo de referencia. Sólo es válido para espesores muy limitados de sedimentos.

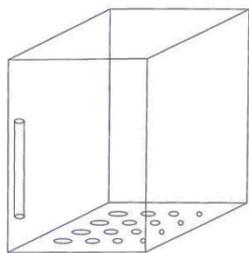


Fig. 1. Sketch of the experimental tank with locations of the electrodes

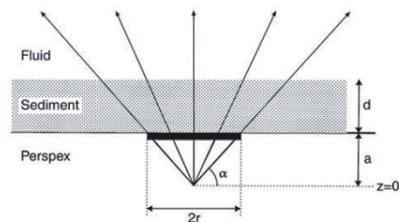


Fig. 3. Electrical field lines through the sediment layer above a bottom electrode

Figura 2.15. Sondas de conductividad para medir el espesor de la capa de sedimentos.

Los métodos basados en el reflectividad óptica son similares a los OBS empleados para medir la turbidez, y también han sido empleados desde hace mucho tiempo (Hydraulic Research Station, Wallingford, 1968). Una sonda emite pulsos de luz infrarroja y uno o varios receptores miden la cantidad de luz reflejada por su entorno, detectando la presencia del fondo (Ballio, 2003; Richards, 1986).

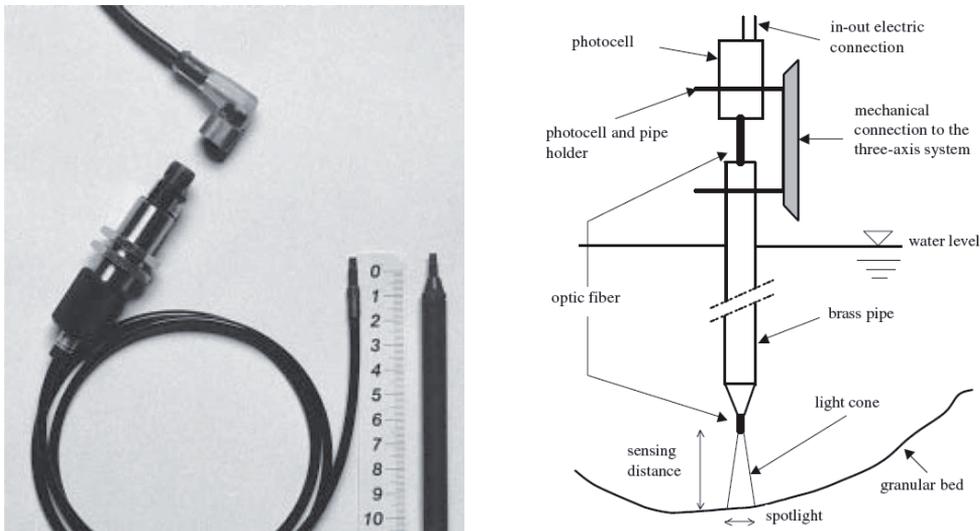


Figura 2.16. Sondas de infrarrojos para detectar la presencia del fondo.

En el caso de estudio de erosión y socavación local alrededor de estructuras como las pilas de un puente, también se han probado sensores de fibra óptica adheridos a la estructura modelizada en el laboratorio (Lin, 2005), aunque esto se separa un poco del tipo de medidas que se pretende en este trabajo.

Al igual que las sondas de conductividad bajo el agua deben acercarse mucho al fondo siendo por tanto potencialmente intrusivas. Si bien pueden ser usadas bajo el agua y en el aire, los valores de reflectividad son muy diferentes por lo que una misma sonda no puede medir en los dos medios. Para espesores muy limitados de sedimentos puede utilizarse como principio de medida la atenuación luminosa en lugar de la reflexión, colocándose en este caso una fuente de luz bajo el lecho de sedimentos y midiendo la luminancia que deja pasar el mismo, proporcional al espesor de la capa (Munro, 2005). Se trata como se ha dicho de una técnica muy limitada en el espesor de sedimentos válidos.

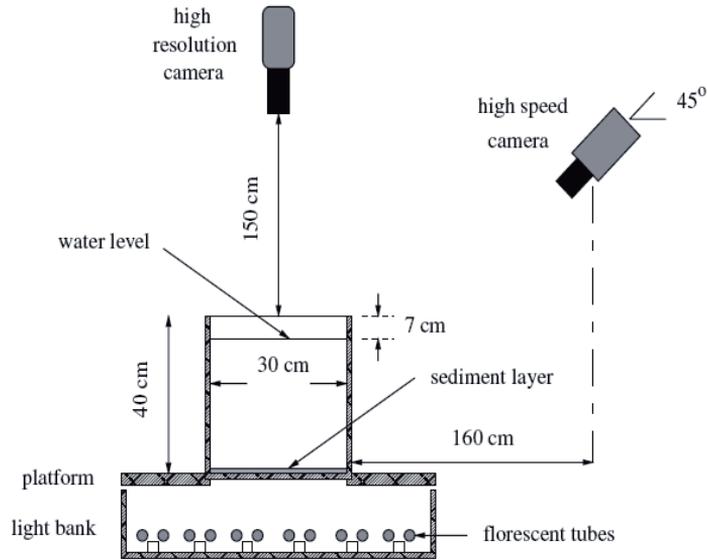


Figura 2.17. Medida del espesor de la capa de sedimentos por atenuación luminosa

Unos de los métodos más empleados en la actualidad son los métodos acústicos basados en sonar en los que una sonda emite un pulso acústico y otra sonda recibe el eco y calcula la distancia en función del tiempo y la velocidad local del sonido en el agua. Además de equipos específicos para realizar esta tarea, tal y como se dijo en la introducción a la medida de otros parámetros hidráulicos los equipos ADV, ADCP y ABS son capaces de medir la posición del fondo basándose en este principio físico.

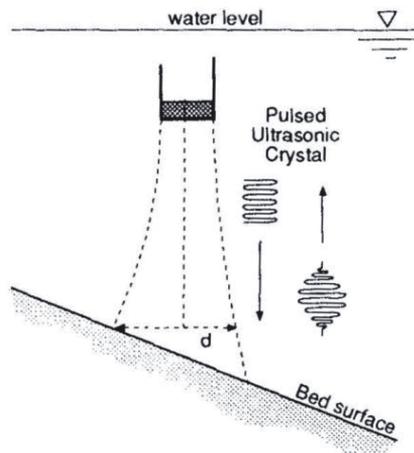


Figura 2.18. Sensor acústico para medir la posición del fondo de sedimentos.

Su resolución vertical está limitada por la longitud de onda empleada (0.6mm a 2,5Mhz), pero estos equipos han evolucionado mucho en las últimas dos décadas de la mano de las técnicas ADV y ADCP, llegando a resoluciones espaciales más elevadas (Best, 1994) entorno a 0,1mm. Friedrichs et al (2005) utilizaron una línea de sensores dispuestos de manera transversal a un canal de experimentación que al ser desplazados a lo largo del eje longitudinal del mismo obtienen una medida de la superficie completa en 3D.

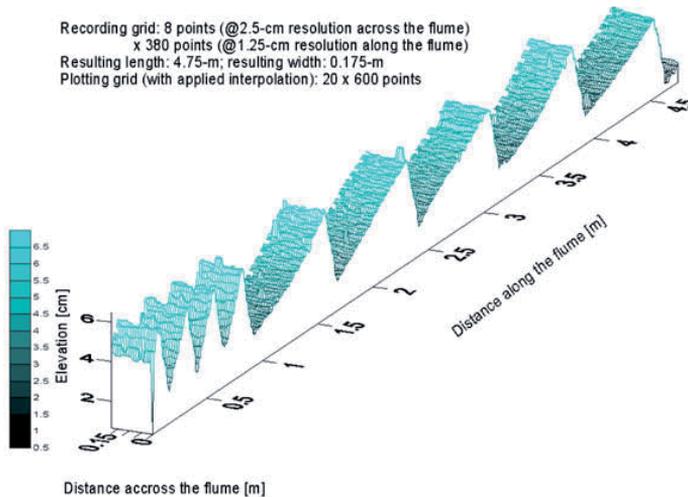


Figura 2.19. Medida de una superficie 3D con sensores acústicos.

Su principal ventaja es la capacidad que tienen para operar en entornos de una turbidez muy elevada y alejados del fondo lo que los hace menos intrusivos que otros. Sin embargo todos ellos tienen una banda muerta de medida que hace que exista un umbral de nivel de agua por debajo del cual no pueden operar. Además el haz de ultrasonidos que emite la sonda tiene una cierta divergencia, con valores entorno a 10° , lo que hace que la medida no sea tan puntual y la resolución horizontal se reduzca a medida que la sonda se aleja del fondo. Este hecho no permite por ejemplo medir con precisión algunas microestructuras como las crestas de los ripples, si bien en cierta manera esta divergencia puede evitarse con un servocontrol que ajuste su posición vertical, lo hace de nuevo a costa de ser intrusivos.

Un problema añadido en el caso de contornos sólidos con superficies especulares es que el eco producido puede ser equívoco respecto de la forma real del mismo, si bien esto no es frecuente en la medida de fondos de sedimentos.

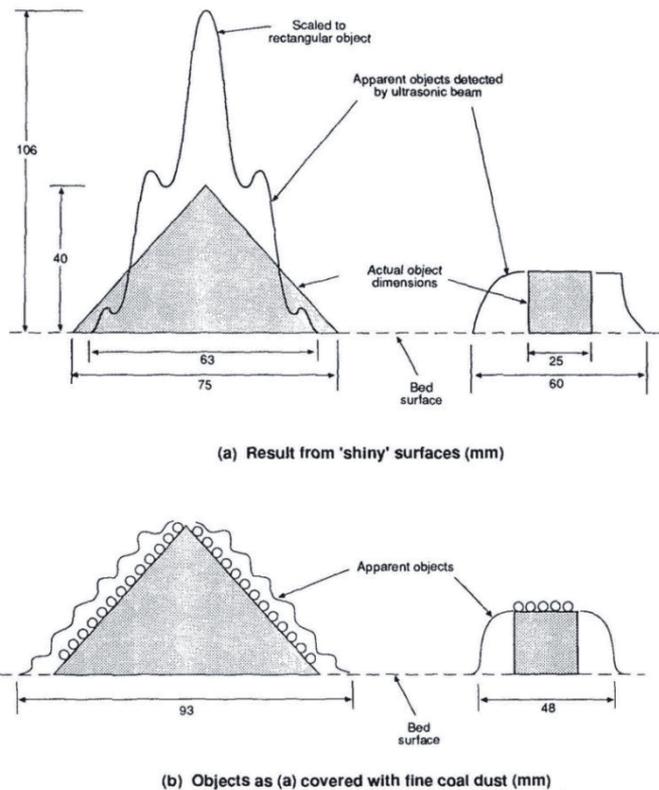


Figura 2.20. Imágenes distorsionadas obtenidas por un sensor de ultrasonidos.

Las diferentes velocidades de transmisión del sonido en aire y agua –incluso la del agua está afectada por la presencia de sedimentos en suspensión– hacen imposible su uso sobre una lámina de agua. Otra desventaja importante respecto a los métodos anteriores es el coste más elevado.

A la vista de la tabla del inicio, el único método universal capaz de medir dentro y fuera del agua de manera anfibia son los sensores de contacto, que tienen muchas implementaciones diferentes desde grandes carros con un brazo móvil una rueda (CIEM UPC) o bien en tamaño más reducido el ofrecido por Deltares (2008). Existen diseño con tamaños muy reducidos con sondas muy ligeras con un pistón en la cabeza desde apenas 5 gramos de peso cuyo movimiento al tocar el fondo es detectado por un sensor de fibra óptica.

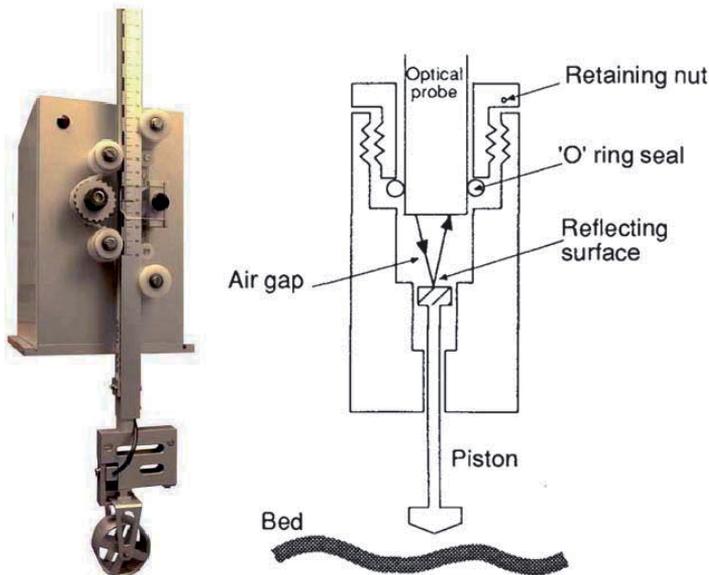


Figura 2.21. Sensores de contacto para detectar la presencia del fondo de sedimentos.

Si bien esta última apenas modifica el fondo en una situación estática, con el experimento en marcha y agua circulando se trata de nuevo de medidas intrusivas en mayor o menor medida.

2.2.3. Medidas en 2D. Sistemas basados en video convencional.

Los primeros intentos de obtener perfiles en dos dimensiones de la posición de un fondo de sedimentos –ya sea en erosión fluvial o costera- se realizaron mediante la toma secuencial de fotografías o la grabación de video a través de un cristal lateral en un canal de ensayo. Además de la relativamente escasa resolución de los equipos de imagen empleados y de los rudimentarios programas de análisis disponibles, el principal problema de estas medidas es el efecto de borde del canal: los procesos hidro y morfodinámicos están condicionados por la presencia del lateral del canal y por tanto asumir que esa medida es representativa de una situación bidimensional implica un error a tener en cuenta. Más aún si se trata de estudiar un problema tridimensional como la erosión en una pila de puente.

La forma inicial de obtener en dichas las imágenes la posición del fondo de sedimentos y la superficie libre del agua era por diferencias de iluminación y contraste, y los resultados de los experimentos –las propias imágenes-

semicuantitativos al incluir en dichas imágenes una escala gráfica. Balachandar y Kells (1998, 2000) utilizaron una cámara de video Sony Hi-8 cuyos frames eran seleccionados y digitalizados a una resolución de 640x480, desarrollaron un programa –ProScan- capaz de extraer la información. Según sus propias mediciones la diferencia entre perfiles respecto de una situación puramente bidimensional era de +/- 5%.

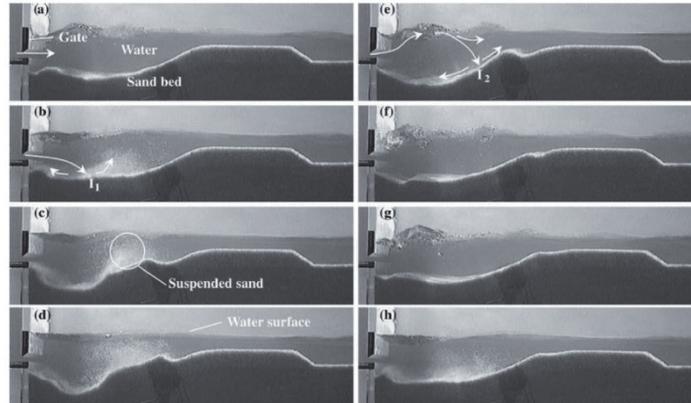


Figura 2.21. Medidas del fondo con video (Balachadar y Kells).

Foote y Horn (1999) emplearon de nuevo una cámara Hi-8 para la medida de la evolución de una playa y los procesos de oleaje (run up y run down) estimando errores de 5 milímetros sobre un campo de visión de 3 metros con una resolución de 352x258. Para su análisis emplearon un software genérico de sistemas de información geográfica (GIS).

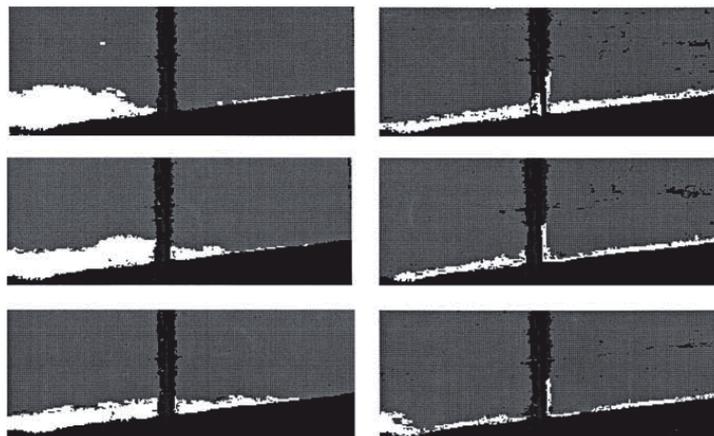


Figura 2.22. Medidas del oleaje y el perfil de playa con video (Foote y Horn)

Más recientemente Erikson et al (2005) emplearon ya herramientas programadas con Matlab para procesar imágenes obtenidas con cámaras de video de 720x576 píxeles con una resolución de 2mm sobre un área de 1,5 metros.

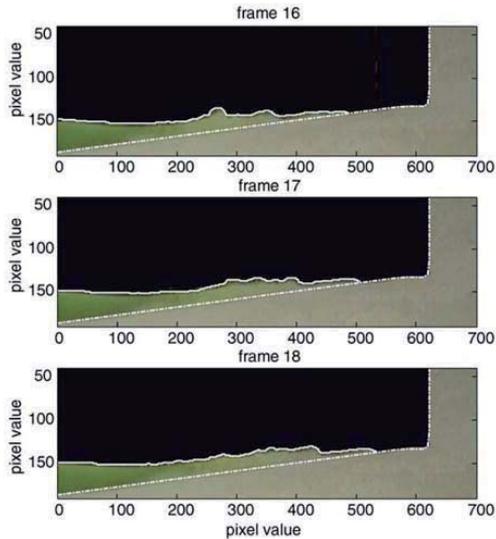


Figura 2.23. Medidas del oleaje y el perfil de playa con video (Erikson et al)

Adduce y LaRocca (2006) utilizaron esta misma técnica combinada con un perfilador doppler para obtener simultáneamente la forma del fondo y los perfiles de velocidades y tensiones tangenciales.

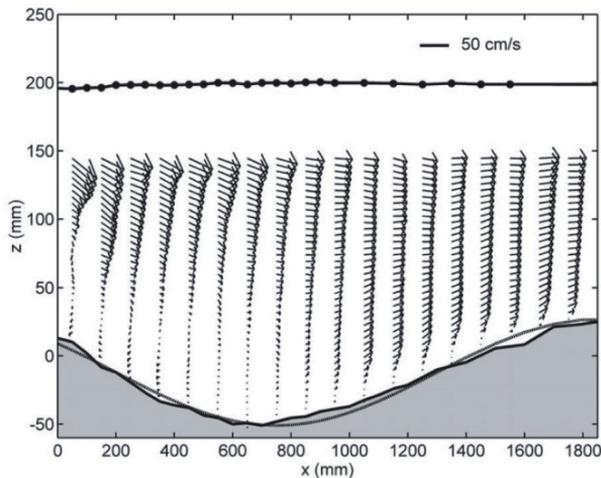


Figura 2.24. Evolución del fondo y medida de velocidades (Adduce y LaRocca).

Younkin et al utilizaron en 2009 una cámara de 4 megapíxeles de uso científico para un estudio similar de la erosión de un chorro plano.

En los últimos años, tal y como se detallará en el siguiente capítulo, el desarrollo y abaratamiento de las cámaras de video digital las ha llevado a resoluciones mucho mayores, de 1920x1080 píxeles para modelos domésticos y 4096 × 2160 (4K video) en modelos profesionales. Sin embargo los mejores resultados se obtienen mediante la iluminación del fondo con un haz láser que muestra de manera directa el perfil del mismo, y en esa dirección se encaminan casi todos los desarrollos actuales.

Cuando se mide la erosión entorno a una estructura como una pila de puente, otro posible método es pintar en ella una escala gráfica y tomar imágenes de la misma de manera secuencial. A pesar de la relativa simplicidad del sistema tiene como principal inconveniente de nuevo que debe limitarse la turbidez del agua. Sumer et al (2001) midieron la erosión aguas abajo de un cilindro vertical mediante una serie de varillas enterradas y un sistema de imagen para ver cuándo quedaban descubiertas, pero se trata de un sistema muy difícil de automatizar limitado a medir el estado final de equilibrio.

2.2.4. Medidas en 2D y 3D basadas en imagen digital y luz estructurada.

Foti et al (2011) realizaron para el proyecto SANDS (Scaling and Analysis and New instrumentation for Dynamic bed testS, Hydralab III) una revisión de los principales instrumentos disponibles para medidas ópticas en 2D y 3D, que tiene ahora su continuación en la iniciativa conjunta WISE (Water-Interface-Sediment Experiments, Hydralab IV) uno de cuyos principales objetivos es *dar un significativo paso delante de la instrumentación clásica 1D para perfiles verticales a resolución quasi 3D*.

En la citada revisión tratan los escáneres láser como la solución actual más extendida. Esta técnica debe encontrar un compromiso entre la extensión de la zona de medida, la resolución de la misma –tanto espacial como temporal- y el tiempo necesario para adquirir y procesar los datos.

Las diferentes técnicas de fotogrametría de estos sistemas tienen alguna particularidad respecto de las empleados fuera del agua pero en esencia se trata de la misma tecnología que será revisada en el capítulo siguiente por lo que en este se citarán ejemplos de uso sin entrar en detalles de funcionamiento.

Probablemente la aproximación más sencilla al problema es la proyección de un plano vertical de luz estructurada -típicamente láser- y observar su intersección con el fondo –el perfil iluminado- a través de un cristal lateral desde una posición ortogonal al plano.

Van der Werf et al (2006) y O’Donohue et al (2006) estudiaron la forma de las dunas (ripples) producidas en un túnel de flujo oscilatorio con una sonda láser puntual móvil y con un perfilador láser, encontrándose con el problema de la turbidez y del tiempo necesario para la toma y procesado de medidas, siendo únicamente válido para obtener el perfil final con el experimento finalizado.

Existe claramente una limitación para estos métodos en el nivel de turbidez, y el umbral de este se encuentra directamente relacionado con la potencia y en menor medida con el color del láser (el rojo tiene menor poder de penetración que el verde o el azul), y con la sensibilidad de las cámaras.

Otro problema añadido a estos sistemas cuando deben medir un fondo de sedimentos bajo una lámina de agua es la refracción de la luz en la superficie libre (o un cristal en el caso de un túnel) y tanto para la toma de medidas como para las calibraciones deberá tenerse en cuenta este fenómeno, lo que no siempre tiene solución. En Delft Hydraulics han probado escáneres láser sumergidos, pero se trata de un equipo con un tamaño tal que no es posible utilizarlo con el experimento en marcha sino únicamente al finalizar el mismo y limitando la velocidad de desplazamiento del equipo (documento técnico comercial de Delft Hydraulics, y de hecho no está en su catálogo comercial en la actualidad).

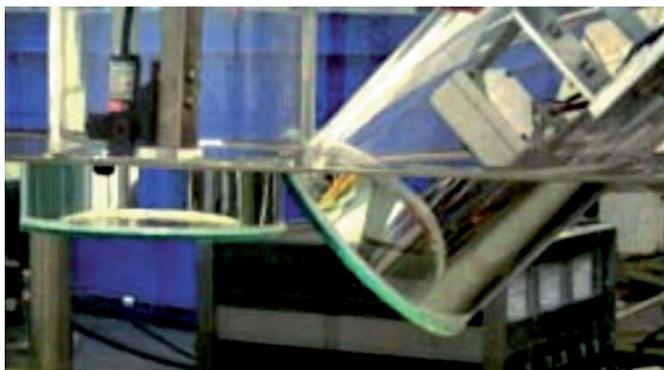


Figura 2.25. Escáner 3D con campana para sumergirlo (Delft Hydraulics).

Entre las técnicas de fotogrametría que se detallarán en el siguiente capítulo se distinguen claramente aquellas basadas en la visión estereográfica de las basadas en luz estructurada en las que se proyectan haces o planos de luz sobre la superficie a digitalizar. El principal problema del primer método es que para que los algoritmos funcionen es necesario establecer claramente la correspondencia de puntos en las dos imágenes –lo que en la visión humana se denomina estereopsis binocular- antes de triangular la posición lo que está muy lejos de ser trivial (Rakesh 1989) y mucho más en una superficie como un lecho de sedimentos. Es por ello que los métodos actuales están casi exclusivamente basados en el uso de luz estructurada. Naturalmente estas dos opciones no son mutuamente excluyentes, y Foti et al experimentaron con equipos SLSV (Structured Light Stereo Vision) como se comentará más adelante.

Para reducir errores así como el tiempo de adquisición y procesado es de vital importancia tratar de que la fase de toma de imágenes sea lo más ‘limpia’ posible con una fuente de luz controlada y un equipo de imagen seleccionado y posicionado de manera que se eviten reflejos, sombras o situaciones de bajo contraste.

Baglio et al (1998) y Faraci et al (2000) utilizaron esta técnica para la observación directa de los ripples producidos por flujo oscilatorio y la erosión producida por el flujo oscilatorio del oleaje alrededor de un cilindro. La principal dificultad de estas técnicas es la extracción de la información del perfil de fondo con un algoritmo robusto capaz de tratar los problemas de distorsión y ruido de las imágenes.

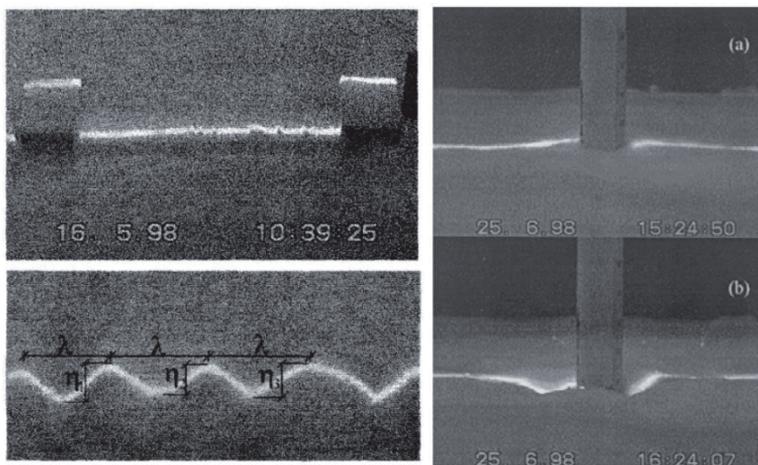


Figura 2.26. Medida de perfiles de fondo con láser e imagen digital (Baglio, Faraci)

En la primera imagen a la izquierda puede observarse la presencia de un ‘calibre’, una forma conocida empleada para establecer una correspondencia en medidas en la imagen con medidas en la realidad, algo que se detallará más tarde y que se conoce en técnicas de visión artificial como mapeo. La resolución de medida estimada por ambos equipos era de 1 milímetro.

La principal ventaja de estas técnicas es la posibilidad de medida de perfiles completos en régimen transitorio con una elevada resolución temporal, de hasta 60 frames por segundo con un equipo de video convencional.

Foti et al (2011) además de la revisión de métodos hicieron sus propios experimentos con una fuente de luz láser y una cámara de fotografía de 2048 x 1536 píxels introducida en el agua mediante una caja estanca.

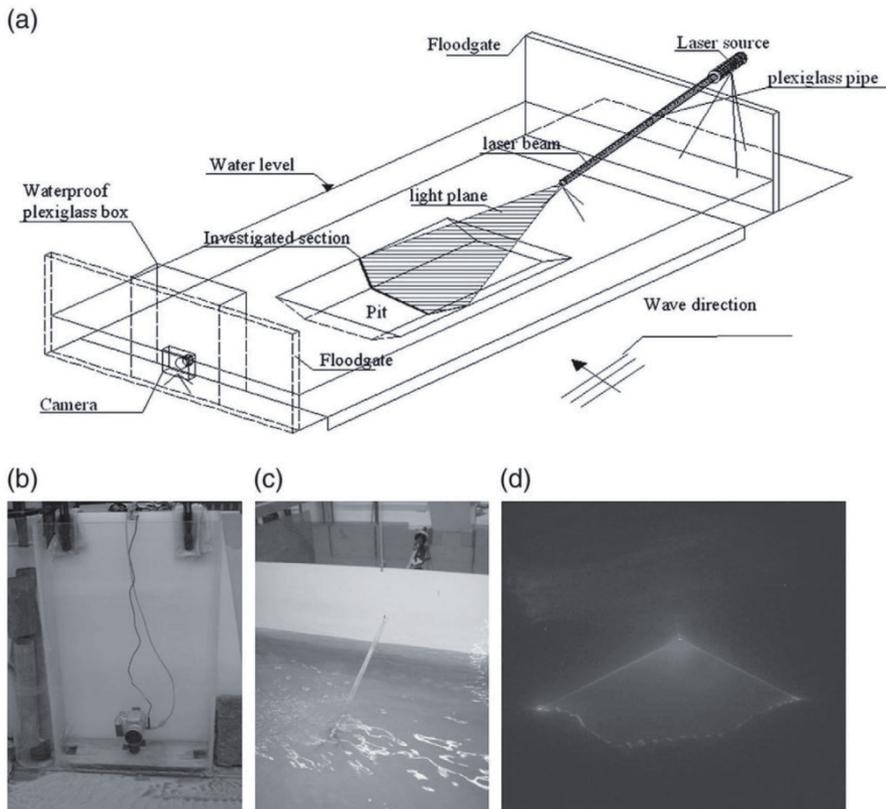


Figura 2.27. Medida de perfiles de fondo con láser e imagen digital (Foti).

Además de los fondos sumergidos, una zona de particular interés en los estudios costeros es la zona de swash –cubierta y descubierta alternativamente por el oleaje- por ser la más activa en el transporte de sedimentos. Esta zona presenta a lo largo de tiempos muy breves condiciones hidrodinámicas muy cambiantes, por lo que establecer un método de tratamiento de datos automatizado y robusto puede ser complejo.

Baglio et al (2001) y Foti et al (2011) probaron también de la proyección de una malla de regular de puntos en lugar de un plano y dos cámaras CCD monocromas capaces de tomar 12 imágenes por segundo con técnicas de luz estructurada y visión estéreo (SLSV).

Para su empleo en los dos canales de oleaje del CIEM diseñaron un procedimiento de calibración basado en patrones para obtener las funciones de mapeo de píxeles a unidades físicas. La precisión vertical de medida obtenida se estimó del orden de un 1 a 4 milímetros para un área de 20 por 20 centímetros cuadrados en el canal pequeño y de 5 a 10 centímetros en el caso del canal grande en un área del orden de 1 por 1 metros cuadrados. A pesar de la relativamente escasa precisión sobre otros métodos, la posibilidad de obtener medidas en régimen transitorio sin parar el experimento, el método representa una alternativa de futuro clara.

Para la determinación de la posición de los puntos utilizaron dos sistemas de visión 3D. El primero es un sistema comercial que tuvo problemas a la hora de identificar patrones en las dos imágenes compara texturas y en el caso del sistema SLSV identifica los patrones proyectados por el láser mejorando la precisión de 10 a 5 centímetros.

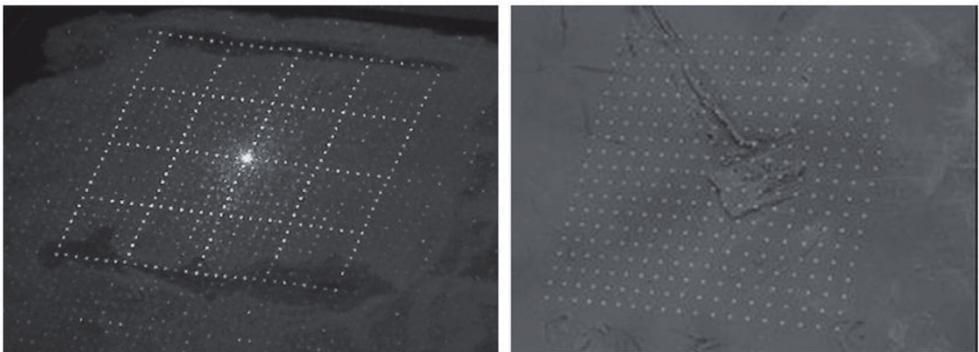


Figura 2.28. Medida de superficies de fondo con láser e imagen digital (CIEM)

2.3. Medida de superficies con un escáner de luz estructurada

2.3.1. Fotogrametría y visión artificial. Visión estereoscópica frente a luz estructurada.

La posibilidad de obtener un modelo geométrico digital de la superficie de un objeto real es una tecnología muy reciente pero relativamente extendida en la actualidad y con grandes aplicaciones dentro del campo de lo que se ha dado en llamar *ingeniería inversa*. Un escáner 3D es un dispositivo que utiliza diferentes técnicas para obtener datos de la forma de un objeto y construir un modelo matemático tridimensional de la misma con muchas aplicaciones diferentes.

Fueron desarrollados inicialmente para aplicaciones industriales pero ahora se están beneficiando de la investigación que se realiza en otros campos interesados en lo mismo, desde la paleontología –modelos digitales de fósiles que evitan su manipulación directa- hasta la creación multimedia de mundos virtuales, desde estudios previos de infraestructuras o edificaciones hasta videojuegos. Existen en el momento tecnologías muy diversas que permiten la reconstrucción de geometrías desde tamaño molecular hasta edificios de varias plantas o incluso modelos completos topográficos.

El proceso de digitalización 3D consta básicamente de dos fases: una de adquisición y una de reconstrucción (Curless, 2000). En la primera el equipo obtiene la posición de una serie de puntos sin tratar en forma de coordenadas, y es en la fase de reconstrucción donde estas nubes de puntos se procesan internamente para extrapolar las superficies con algún modelo matemático en forma de conjuntos de polígonos o de polinomios de interpolación.

La fase de adquisición de datos está basada habitualmente en varios tipos de tecnologías o una combinación de ellas, las tres más importantes son (Besl, 1988).

- **Técnicas de Trazado** (tracking). Estos sistemas posicionan una sonda sobre el objeto (palpador) y una serie de sensores determinan su posición en el espacio y trasladan su posición al ordenador. La mayor desventaja es que requiere el contacto físico por lo que puede modificar o dañar la superficie escaneada. Además el movimiento físico del palpador para reconstruir toda la superficie puede ser muy lento.

- **Técnicas de Medición de Distancia** (range finding o tiempo de vuelo). Estos sistemas obtienen puntos de la superficie mediante sus alturas en z – desplazándose en un plano xy - o sus distancias al un punto fijo –girando en el espacio- o bien distancias y ángulos en un sistema de coordenadas esféricas. Para ello realizan mediciones con algún sistema clásico como los ultrasonidos, o bien algún otro tipo de sistema para medir distancias en el espacio como el LIDAR (Light Detection and Ranging).
- **Técnicas de Imagen** (imaging). Los sistemas basados en la imagen obtienen una o más imágenes en dos dimensiones con cámaras y las usan como entrada para un procesamiento posterior. La obtención de la posición de los puntos en el espacio se determina por triangulación. Los sistemas activos proyectan previamente una malla de luz estructurada, usualmente láser, que después será localizada en las imágenes tomadas. Los pasivos toman las imágenes con la luz ambiente, con varias cámaras para hacer fotogrametría estéreo.

Las técnicas de imagen también se conocen genéricamente como fotogrametría (Hancock 2001) y presentan dos ventajas fundamentales sobre las otras dos: son más simples y económicas que las técnicas de medición de distancia, y son menos intrusivas y más rápidas que las técnicas de trazado o tracking.

La fotogrametría puede considerarse dentro de las técnicas de visión artificial, visión por ordenador (del inglés computer vision) o visión técnica, un subcampo de la inteligencia artificial. El propósito de la visión artificial es programar un computador para que "entienda" una escena o las características de una imagen. La palabra fotogrametría deriva del vocablo "fotograma" (de "phos", "photós", luz, y "gramma", trazado, dibujo), como algo listo, disponible (una foto), y "metrón", medir.

Por lo que resulta que el concepto de fotogrametría es: "medir sobre fotos". Si trabajamos con una foto podemos obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si trabajamos con dos o más fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), podremos tener visión estereoscópica; o dicho de otro modo, información tridimensional.

La técnica básica para obtener medidas en una imagen es la triangulación, el uso de la trigonometría de triángulos para determinar la posición de puntos o la medida de distancias y áreas (Curless, 1995). Existen dos métodos básicos para

triangular la posición de un punto mediante la fotografía: la visión estereoscópica o la visión con luz estructurada.

El primero está basado en observar un mismo punto desde dos o más puntos de vista diferentes (Park, 2003). Para funcionar requiere identificar en las imágenes un punto coincidente lo que supone la parte más compleja del proceso, por lo que la visión con luz estructurada es mucho más sencilla de operar (Chen, 1992). Tal y como se introdujo en el capítulo anterior ambos métodos no son excluyentes, pudiéndose trabajar con luz estructurada y visión estéreo.

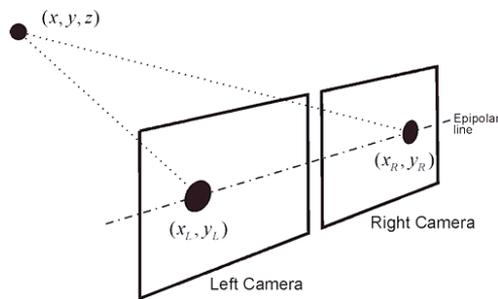


Figura 2.29. Geometría de la visión estereoscópica.

2.3.2. Luz estructurada. Iluminación convencional y luz láser. Refracción de la luz y dispersión cromática.

Cualquier fotógrafo sabe que la calidad de las imágenes que toma está definida fundamentalmente por la calidad de la luz de la escena que registra. Esto se trasladará de manera muy particular a cualquier metodología de medida en que emplee la toma de imágenes como parte fundamental del proceso.

Una parte de las técnicas de visión artificial que se introducirán en el siguiente capítulo están basadas en el uso de luz estructurada. Se define la luz estructurada como aquella que tiene una direccionalidad bien conocida y controlable. Las fuentes de luz estructurada no dispersan la luz sino que la proyectan de manera controlada formando patrones de iluminación prediseñados (Hunter 2011).

La forma más sencilla de luz estructurada podría ser la sombra producida por un objeto iluminado por una fuente de luz situada a una distancia infinita o de un tamaño muy pequeño en comparación con la distancia a la que está situada, lo que en fotografía se conoce como luz dura (Freeman 2010).

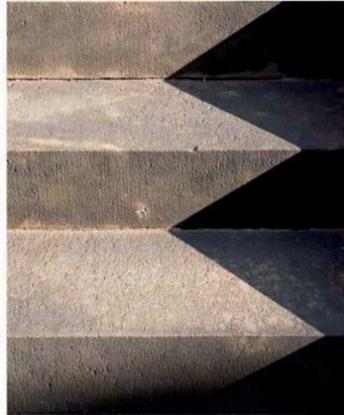


Figura 2.30. Luz solar dura incidiendo sobre unos escalones

Las fuentes de luz estructurada podrán ser de luz convencional respetando este principio para producir luz dura, pero en general el nivel de direccionalidad y control necesario se conseguirá más fácilmente con iluminación láser. De su definición en la Real Academia Española de la Lengua:

(Del ingl. laser, acrón. de light amplification by stimulated emission of radiation, amplificación de luz mediante emisión inducida de radiación).

1. m. Dispositivo electrónico que, basado en la emisión inducida, amplifica de manera extraordinaria un haz de luz monocromático y coherente.
2. m. Este mismo haz.

Las diferencias con respecto a la luz convencional son en este caso todas ellas ventajas para el propósito del uso de luz estructurada:

- Posee una elevada direccionalidad –*colimación*– del haz, que permite que su proyección sobre los objetos sea una línea muy delgada.
- Se trata en todos los casos de luz monocromática.

Existen innumerables fuentes de luz láser de diferentes colores (O’Shea 1977), no sólo visibles, y en principio cualquiera de ellos será válido sin más restricción que tener una potencia dentro de unos determinados valores. El proceso de formación del haz o las características físicas de los equipos exceden con mucho este Estado del Arte por lo que se verán sólo algunas características en algunos casos concretos empleados.

Los láser de trabajo están sujetos a unas estrictas normas de seguridad que los clasifican de acuerdo con el riesgo que suponen para la salud de los usuarios (AENOR 1996 y 2000). Durante el estudio se han empleado láseres de clase 2, que no suponen ningún riesgo para la salud excepto el derivado de la exposición directa, frontal y prolongada del haz contra los ojos, y láseres de clase 4, con un riesgo potencial elevado que lleva a la necesidad de normativas de seguridad muy estrictas.

El haz producido por una fuente láser tiene forma aproximadamente cilíndrica y en el caso de las fuentes de Nd:YAG PIV del CITEEC del orden de 7 mm de diámetro. Para producir un plano será necesario disponer una serie de lentes que lo estrecharán en un sentido y lo ampliarán en forma de abanico en el otro. Existen varias combinaciones de lentes para producir este efecto, se presentará una de ellas a modo de ejemplo. En este caso se emplearán tres lentes cilíndricas, aunque con diferente orientación: una de ellas produce el abanico y las otras dos estrechan el haz.

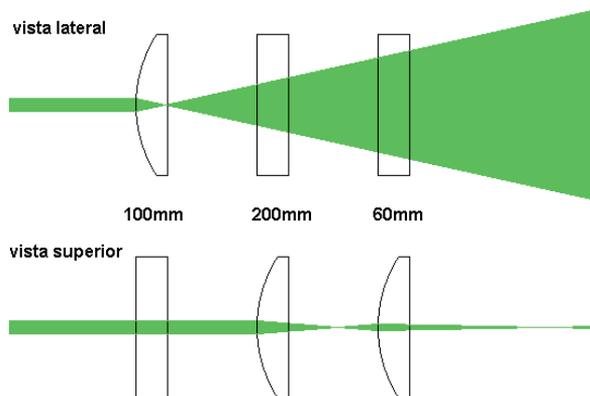


Figura 2.30. Formación de un plano láser con lentes cilíndricas

La distancia entre éstas últimas es variable, y de este modo la lente puede enfocarse para que la mínima anchura del plano coincida en el lugar deseado.

El plano láser y la imagen que toma la cámara se tomarán en ocasiones a través de superficies que separan varios medios como aire, agua o vidrio. Cuando un rayo de luz atraviesa la superficie que separa dos medios con diferente velocidad de transmisión y no lo hace de forma normal a la misma, sufre una desviación en el ángulo de incidencia conocida como refracción, y una parte de la misma no

atraviesa la superficie y sufre una reflexión con el mismo ángulo. Esta propiedad de la luz nos permite diseñar lentes y con ellas construir telescopios, objetivos fotográficos, o el ejemplo más sencillo, la lupa. Sin ella no existiría la óptica tal y como la conocemos.

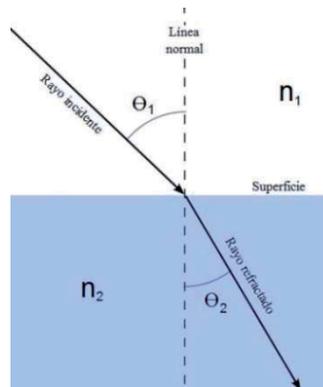


Figura 2.31. Refracción de un haz de luz al cambiar de medio de propagación.

La relación matemática que gobierna la refracción es la ley de Snell

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2) \quad [2]$$

en donde

- n_1, n_2 son los índices de refracción de ambos medios, que expresan la velocidad de transmisión en forma relativa a la velocidad de la luz en el vacío, al cual se le asigna el valor $n=1$.
- θ_1, θ_2 son los ángulos de incidencia y de refracción.

En la forma matemática de la ley pueden verse los dos extremos de la misma

- Cuando un haz entra de forma perpendicular a la superficie de separación de ambos medios, la única solución matemática de la ecuación es $\theta_1 = \theta_2 = 0$, y el haz no se desvía.
- Cuando un haz entra con un ángulo cuyo seno es igual al inverso de su índice de refracción, se produce el fenómeno de reflexión total y el haz no atraviesa la superficie. Existe pues, un límite para que un rayo de luz cambie de medio.

El índice de refracción de la luz depende no solo del medio al que cambia sino de su color, de modo que diferentes longitudes de onda sufren diferentes cambios de dirección.

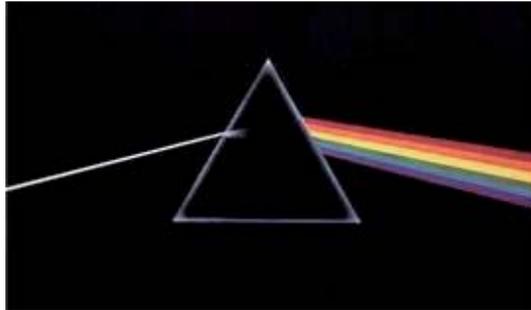


Figura 2.33. Dispersión cromática refractiva en un medio.

Los instrumentos ópticos y en particular los objetivos fotográficos deben corregir las diferentes refracciones, ya que en el caso de tener que enfocar un haz a una determinada distancia con una lente, las diferentes frecuencias incidirán de diferente manera en el medio sensible, en un fenómeno conocido como *aberración cromática*.

Los diferentes colores de luz se enfocan en diferentes planos –produciendo falta de nitidez- y en diferentes lugares –produciendo halos de colores en los bordes con mucho contraste-. El primer problema afecta sobre todo a los teleobjetivos y a los telescopios. El segundo es más visible en los objetivo angulares.

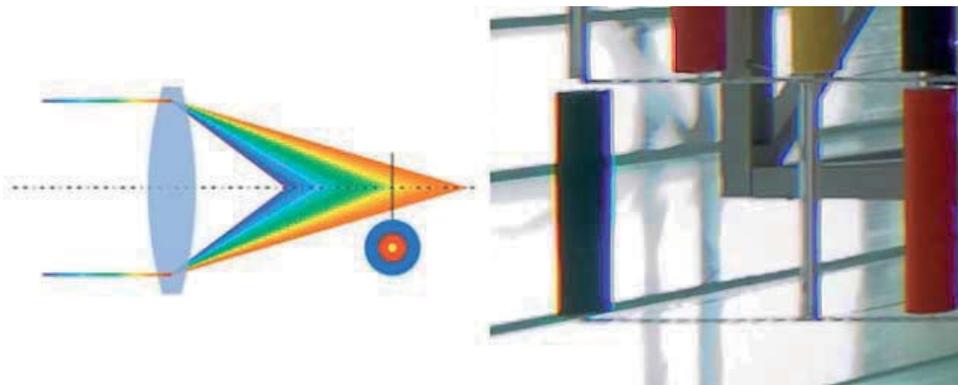


Figura 2.34. Aberraciones cromáticas longitudinal y lateral.

En 1729, Chester Moore Hall encontró una solución a este problema usando dos diferentes tipos de vidrio –de Crown y de Flint-, y produciendo un conjunto con una lente convexa y una cóncava que compensaban este defecto. Tratando de evitar que alguien se adelantase a su descubrimiento encargó cada una de ellas a un fabricante distinto, pero con la mala suerte de que éstos a su vez lo subcontrataron al mismo, que se dio cuenta de lo que pretendía y así, fue el óptico londinense John Dollond quien patentó el invento y quien obtuvo beneficio económico, siendo el fabricante de telescopios más reputado de la época.

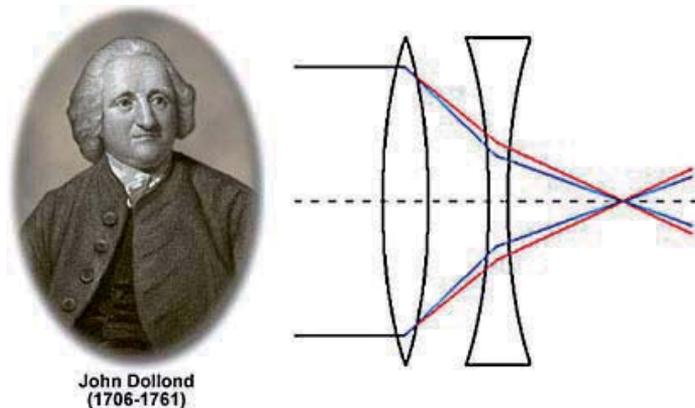


Figura 2.35. Chester Moore Hall y su sistema para corregir la aberración cromática.

Sin embargo, el hecho de trabajar con luz láser, con una única longitud de onda, hace que no sea necesario considerar esta fuente de error. Otros instrumentos similares trabajan con luz ambiente y la precisión en la toma de imágenes bajo una lámina de agua puede verse comprometida, o al menos esta dispersión deberá ser tenida en cuenta.

2.3.3. Formación de la imagen en el plano de medida. Lentes fotográficas: deformaciones cilíndricas y de perspectiva.

La toma de imágenes con cualquier tipo de cámara y las transformaciones ópticas introducidas en las mismas pueden asimilarse a un modelo simplificado de cámara de perspectiva o tipo ‘pinhole’ en las que la luz atraviesa un pequeño orificio para proyectarse invertida en un plano tras él dentro de una caja (Jähne 1997).

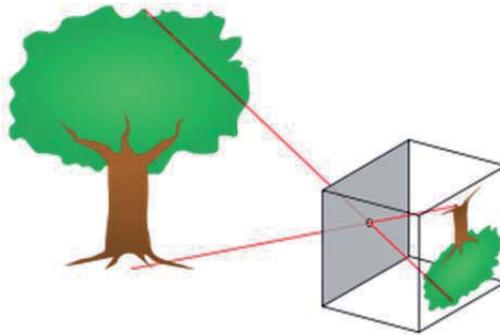
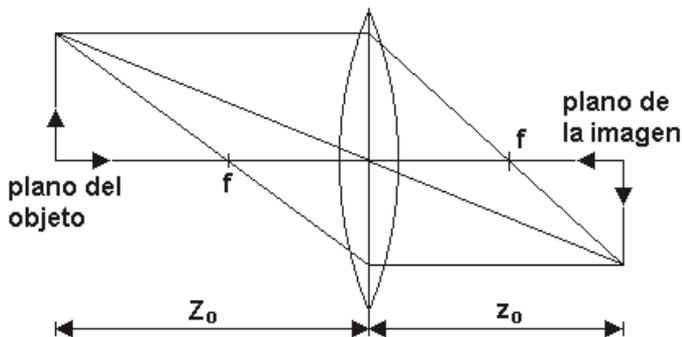


Figura 2.36. Inversión de imagen en una cámara de perspectiva o 'pinhole'.

Las siguientes leyes básicas de la óptica física relacionan la distancia focal de las lentes con la distancia a la que los objetos aparecen enfocados en el plano de la imagen y con la magnificación producida (M), relación entre el tamaño real del objeto y de su imagen.



$$\frac{1}{z_0} + \frac{1}{Z_0} = \frac{1}{f} \quad [3]$$

$$M = \frac{z_0}{Z_0} \quad [4]$$

Figura 2.37. Formación de una imagen con una lente.

Sin embargo las lentes reales difieren de este modelo ideal de proyección y cuando se toman imágenes con una cámara y se pretende extraer medidas de las mismas es necesario conocer como es transformada la realidad en un archivo de datos digitales. Esta transformación introduce varias deformaciones que hacen que las líneas rectas dejen de serlo y las paralelas sean convergentes.

- Deformaciones cilíndricas debidas a los objetivos empleados, que curvan el campo en los extremos.
- Deformaciones de perspectiva, debidas a fotografiar un plano desde un punto de vista en el que el eje de la lente no es ortogonal al mismo.

Las distorsiones cilíndricas que introducen las ópticas en la toma de imágenes, con patrones conocidos en la nomenclatura fotográfica como deformaciones de barril, cojín o bigote, tienen la forma que aparece en las imágenes siguientes.

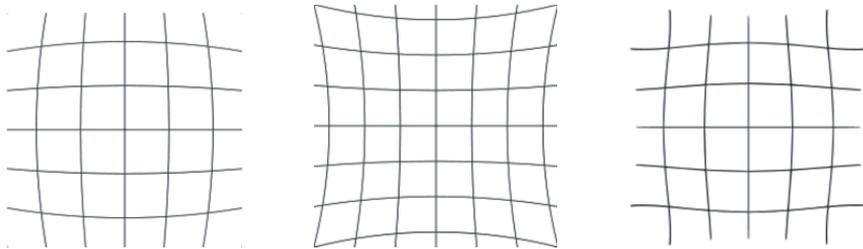


Figura 2.38. Distorsiones cilíndricas en una lente fotográfica.

Estas distorsiones pueden ser corregidas en el procesado de la imagen, pero utilizar una óptica corregida que produzca líneas rectas hace la tarea mucho más sencilla (Soloff, 1997).

Las ópticas de focal fija con esta distorsión corregida con algunas excepciones son muy costosas, pero no constituyen la única opción. Los zoom baratos vendidos en kit con las cámaras suelen tener distorsión de barril en un extremos del zoom, distorsión de cojín en otro extremo y una distorsión mínima o directamente despreciable en algún punto intermedio. Eso por ejemplo se cumple para el Nikkor 18-55 a una focal de 35mm y para el Sony NEX 18-5 a 24mm (www.photozone.de). Ambos objetivos han sido utilizados por que esas distancias focales medias son particularmente útiles en las configuraciones típicas de ensayo.

Muchas cámaras utilizan procesamiento interno para corregir en sus imágenes esta distorsión y exportar archivos JPG supuestamente libre de ella, pero los resultados son dispares y se trata de ‘cajas negras’ en las que no se tiene acceso a los datos en bruto.

Las deformaciones de perspectiva se producen en cambio no por defectos en la óptica empleada sino por el hecho del que los planos de los objetos y del sensor de imagen no sean paralelos (Faugeras, 1993). Tal y como se verá luego,

eligiendo una lentes sin distorsiones, corrección de esta deformación de perspectiva se reduce a encontrar una función bilineal que relaciona las coordenadas en píxeles en la imagen (i,j) en coordenadas físicas en la realidad (x,y) .

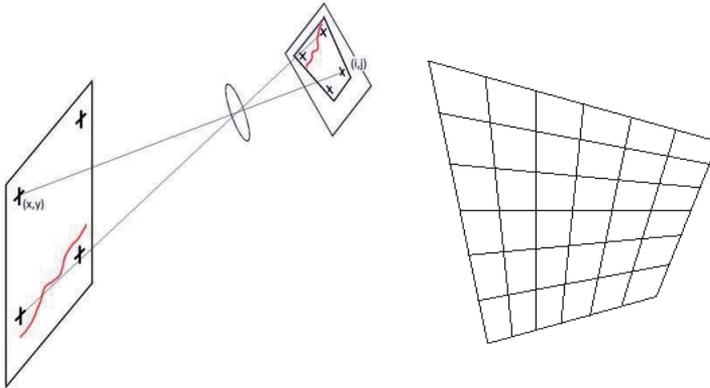


Figura 2.39. Transformación proyectiva entre planos no paralelos.

En el caso de una lente sin distorsiones también se pueden corregir durante la toma de la imagen con lentes especializadas basadas en el principio de Scheimpflug (Scheimpflug, 1904). El desplazamiento –shift- de la lente fuera del eje central del medio de registro evita esta distorsión manteniendo las líneas verticales y horizontales rectas y paralelas.

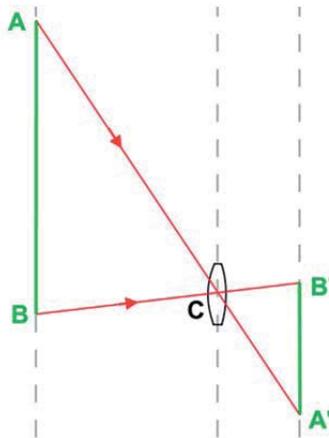


Figura 2.40. Desplazamiento de la lente de acuerdo con el principio de Scheimpflug

Estas lentes habitualmente permiten también el basculamiento –tilt- del eje óptico de la lente respecto del plano del sensor, y con ello puede conseguirse enfocar

correctamente en el plano del sensor un plano que no es paralelo al mismo puede evitar esto. La forma de conseguir esto se puede expresar geoméricamente de forma que el plano del objeto, el plano de la lente y el plano de la imagen deben converger en una misma recta (en el dibujo plano un punto), tal y como se ve en la figura. Tal situación se denomina condición de Scheimpflug.

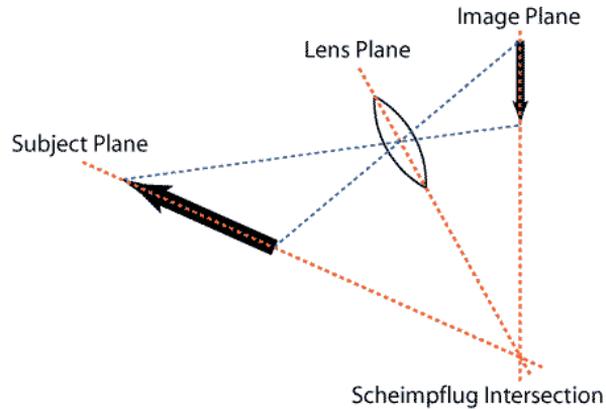


Figura 2.41. Basculamiento de la lente de acuerdo con el principio de Scheimpflug

Pero al contrario de lo dicho para las ópticas corregidas de precio reducido, éste no es el caso con las ópticas especializadas tilt-shift (en la imagen dos modelos de Canon), con precios muy elevados. Si las ópticas no curvan el borde la corrección de la distorsión de perspectiva en el tratamiento es muy sencilla, por lo que este tipo de lentes no serán empleadas en general.



Figura 2.42. Lentes fotográficas especializadas tilt-shift.

2.3.4. Adquisición de imágenes. Sensores digitales y evolución en la última década. Vídeo digital.

La extracción de información métrica en una imagen, fotogrametría, se ha beneficiado del desarrollo de los ordenadores para el tratamiento digital de la información. Si bien en origen se tomaban imágenes en un soporte analógico para digitalizarse el paso a la toma digital directa ahorra posibles fuentes de error además de tiempo. Además, y a pesar de que la fotografía digital existe desde hace 25 años, no ha sido más allá de la última década que se ha producido una evolución significativa en la imagen digital en tres aspectos fundamentales para su uso científico.

Las cámaras de los equipos científicos específicos que se emplearán en esta tesis tienen una resolución típica de 1 a 2 megapíxeles y una sensibilidad de 50 a 100 ISO. Además del precio, las ventajas de utilizar una cámara convencional son las siguientes:

- Sensibilidad ISO mejorada con valores entre 6400 y 12800 en equipos con un precio relativamente bajo.
- Resolución espacial mejorada con cámaras estándar con resoluciones entre 12 y 24 megapíxeles, que sobre un área típica de 4x3 metros dan como resultado resoluciones de medida por debajo de un milímetro y que son capaces de tomar imágenes a velocidades entorno a un hercio.
- Resolución temporal mejorada con capacidades de vídeo digital en alta resolución (2 megapíxeles) a una velocidad de 60 imágenes por segundo.

Naturalmente las dos últimas posibilidades no son excluyentes y pueden utilizarse simultáneamente dos cámaras para grabar imágenes y vídeo HD.

En paralelo al desarrollo de las cámaras digitales ha ido el desarrollo de software comercial para el tratamiento de las imágenes obtenidas con ellas con paquetes generalistas como Photoshop o Gimp, y otros más específicos para el uso científico como los toolboxes de tratamiento de imágenes de Matlab. En este tiempo el desarrollo de algoritmos en el campo de la visión artificial también ha experimentado un avance espectacular.

Por último, y no menos importante, el precio de los equipos ha seguido el camino inverso, más parejo a la ley de Moore de los microprocesadores, haciendo que sean cada vez más accesibles.

El desarrollo de las herramientas de evaluación de equipos fotográficos ha seguido un camino parejo al de Internet y actualmente las mejores están en portales especializados. En la actualidad existen dos referencias de rigor e independencia:

- Para el estudio del rendimiento de sensores digitales, la web DxO Mark de la firma DxO Labs, fabricantes de software de tratamiento fotográfico.
- Para el análisis de objetivos intercambiables para cámaras fotográficas, la web Photozone.de realiza análisis intensivos que incluyen una característica particularmente útil para la fotogrametría, la medida de la distorsión óptica.

De la primera se ha extraído el gráfico siguiente, que reflejan la evolución temporal de la respuesta a ISOs altos o relación señal-ruido junto con el precio de los mismos. Esta mejora posibilita el uso de fuentes láser más económicas, menos peligrosas y de mayor disponibilidad. En el apartado siguiente se usará la información de la segunda web presentada.

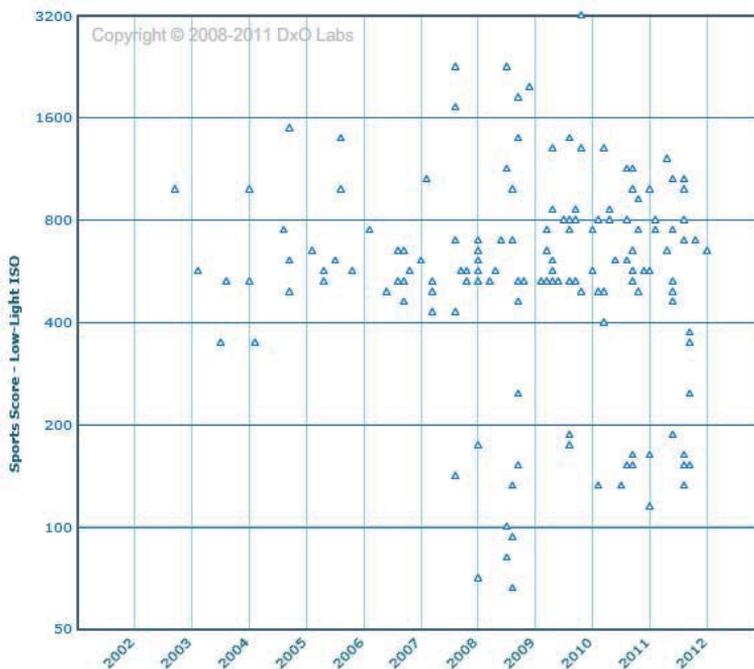


Figura 2.43. Evolución temporal de la sensibilidad ISO máxima (DxOMark)

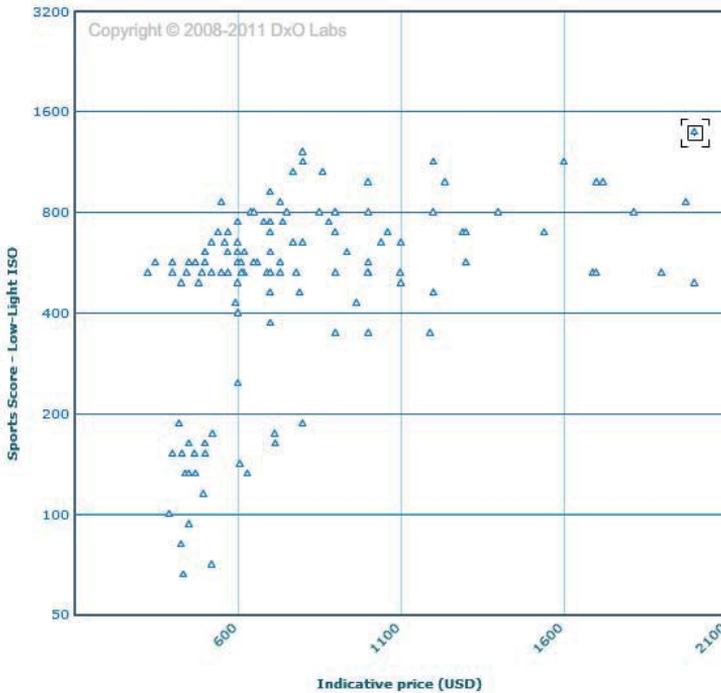


Figura 2.44. Sensibilidad ISO máxima frente al precio en dólares (DxOMark)

Probablemente las mejores cámaras para realizar esta tarea son las réflex digitales (DSLR, digital single lens reflex) y las cámaras compactas de objetivos intercambiables (CSC, compact system camera). Ambas pueden tomar imágenes con esas sensibilidades ISO y utilizan lentes intercambiables lo que las dota de una mayor versatilidad.

2.3.5. Mapeado de píxeles a coordenadas reales.

Una vez tomadas las imágenes con las cámaras, será necesario resituar en ellas las coordenadas reales de los objetos fotografiados a partir de las posiciones en la imagen en forma discreta en píxeles. Los procedimientos y las funciones obtenidas de los mismos para transformar posiciones en la imagen en píxeles a coordenadas reales se denominan genéricamente ‘mapeo’ o ‘mapeado’ (Nishimura, 2000).

En el caso concreto de que se fotografíe una imagen plana -y el perfil proyectado por un láser lo es- y se utilice una lente corregida sin distorsión cilíndrica, este cambio de coordenadas del plano del sensor al plano real es una transformación proyectiva sencilla.

Los métodos para la obtención de esta transformación pueden ser puramente trigonométricos o bien hacerse a partir de una imagen tomada de un patrón con una serie de marcas cuyas coordenadas reales son conocidas para luego obtener la función de transformación por ingeniería inversa. Si el patrón de calibración, que debe ser coplanario con todas las medidas posteriores, tiene cuatro marcas (four-point mapping, Jäne 1997) puede establecerse entre ellas una función bilineal y biunívoca de la forma

$$x = a_1 + a_2 \cdot i + a_3 \cdot j + a_4 \cdot i \cdot j \quad [5]$$

$$y = b_1 + b_2 \cdot i + b_3 \cdot j + b_4 \cdot i \cdot j \quad [6]$$

Lo que aplicada a las cuatro marcas de calibración (x,y) y las cuatro posiciones de las mismas (i,j) en la imagen tomada da un sistema de 8 ecuaciones y 8 incógnitas

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ x_2 \\ y_2 \\ x_3 \\ y_3 \\ x_4 \\ y_4 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i_1 & j_1 & i_1 \cdot j_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_1 & j_1 & i_1 \cdot j_1 \\ 1 & i_2 & j_2 & i_2 \cdot j_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_2 & j_2 & i_2 \cdot j_2 \\ 1 & i_3 & j_3 & i_3 \cdot j_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_3 & j_3 & i_3 \cdot j_3 \\ 1 & i_4 & j_4 & i_4 \cdot j_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & i_4 & j_4 & i_4 \cdot j_4 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{Bmatrix} \quad [7]$$

En realidad se trata de dos sistemas de 4 ecuaciones y 4 incógnitas independientes entre sí que pueden resolverse con un planteamiento más sencillo

$$\begin{Bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i_1 & j_1 & i_1 \cdot j_1 \\ 1 & i_2 & j_2 & i_2 \cdot j_2 \\ 1 & i_3 & j_3 & i_3 \cdot j_3 \\ 1 & i_4 & j_4 & i_4 \cdot j_4 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \\ a_4 & b_4 \end{Bmatrix} \quad [8]$$

Invirtiéndola matriz de índices y multiplicándola por la de coordenadas físicas obtenemos los coeficientes a_i, b_i que definen finalmente la transformación.

Un detalle importante a mencionar es que por convención los ejes coordenados representan el eje vertical con valores crecientes de la coordenada hacia arriba en la realidad y sin embargo para las medidas en píxeles en una imagen es la contraria lo que hace que algunos coeficientes de la transformación sean negativos.

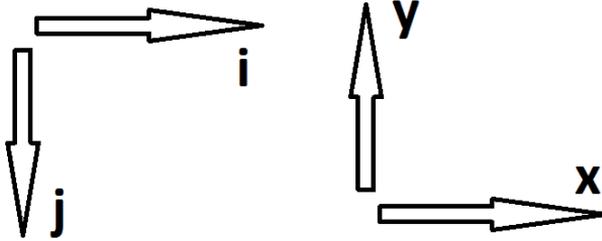


Figura 2.45. Dirección y sentido de los ejes coordenados en una imagen digital

Como ejemplo este proceso ha sido realizado para otro proyecto del mismo grupo de investigación (Anta et al, 2007) con unas imágenes de video digital que pueden verse en la figuras siguientes.

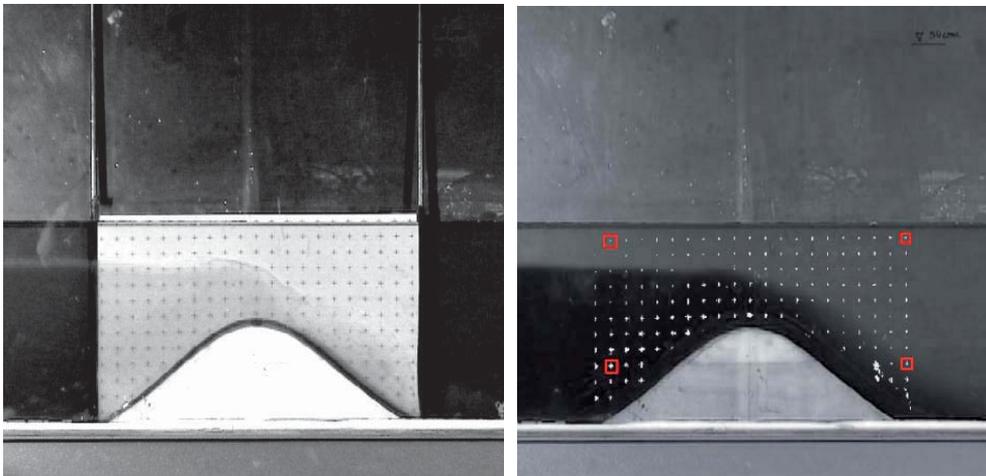


Figura 2.46. Mapeo de coordenadas en un estudio de flujo bicapa.

En las imágenes mostradas se han establecido unos orígenes de coordenadas arbitrarios que relaciones puntos en la imagen con coordenadas reales

Coordenadas en la imagen (pix)		Coordenadas reales (mm)	
i	j	Y	Y
221	251	-180	260
221	403	-180	80
520	252	180	260
520	404	180	80

Tabla 2.3. Coordenadas físicas y píxeles correspondientes en una imagen digital

Resolviendo el sistema se tienen los coeficientes de la transformación

a_1	-446.0870	b_1	556.3616
a_2	1.2040	b_2	0.0040
a_3	0	b_3	-1.1842
a_4	0	b_4	0

Tabla 2.4. Coeficientes de la función de transformación de coordenadas.

Cualquier otro punto de la imagen –en particular puntos seleccionados del perfil dibujado por el láser- puede ahora convertirse a unidades físicas en modelo o prototipo.

El hecho de que en este caso el eje de la cámara sea ortogonal al plano de medida y la plantilla hace que las funciones que relacionan las coordenadas sean más sencillas. Este sería también el caso de utilizar una lente con desplazamiento y los dos planos paralelos.

$$x = a_1 + a_2 \cdot i \quad [9]$$

$$y = b_1 + b_3 \cdot j \quad [10]$$

El primer coeficiente de cada ecuación es un decalaje u offset, y el segundo es la magnificación de imagen que relaciona las unidades físicas en milímetros o cualquier otra con unidades en píxeles en la imagen. Si bien este no será el caso general nos sirve para estimar la magnificación y con ella el error de medida a partir del segundo parámetro. Tal y como estaba previsto por la convención habitual de ejes, la magnificación en el eje vertical – b_3 - es negativa.

Si la lente tiene distorsiones o se producen por efecto de la refracción del agua puede definirse un procedimiento análogo con más puntos conocidos en la imagen patrón y funciones de transformación de orden superior. Es muy importante que las condiciones de calibración y medida sean las mismas, no solo respecto a la posición relativa del plano láser, el patrón de calibración y la cámara –que debe mantenerse de manera cuidadosa- sino también en cuanto a la presencia de agua. Si se van a tomar las medidas a través de una lámina de agua, debe hacerse la calibración en idénticas condiciones. Es posible realizar calibraciones en condiciones ‘secas’ y luego modificarlas para que sean válidas en agua pero el procedimiento se complica extraordinariamente (Lavest, 2003).

La manera de localizar en una imagen de calibración las marcas se verá en el capítulo dedicado al tratamiento de imágenes.

2.3.6. Equipos comerciales y experimentales. Polhemus FastScan.

Una lista no exhaustiva de los equipos comerciales más relevantes por su relación con la aplicación deseada en el caso particular de este estudio podría ser la siguiente:

- Arius3D de Foundation System, basado en un escáner láser y un sistema de control de desplazamiento del mismo.
- 3rdTech DeltaSphere, diseñado para escanear una estancia completa con aplicaciones en reconstrucción forense y edificación.
- Laser Scanner Range de Faro (Laser Designs Inc.), que opera con una cabeza robotizada similar a la de una estación total con técnicas de medición de distancia.
- VI-9i/Vivid 910/Range7/Range 5 Laser Scanner de Konica Minolta, con tecnologías láser activas y objetivos intercambiables.
- Colour 3D Laser Sensor, de Micrometric Vision Technologies, basado en imagen digital pero con luz natural. La misma firma tiene un modelo que proyecta luz láser.
- MobileScan3D de Descam (antes 3D Scanners Ltd.), escáner láser de mano para la digitalización de superficies y colores.
- CopyCAD, de Delcam, Plc., herramienta software completa de modelado CAD-CAM.

El principio de operación del sistema adquirido por el CITEEC –Polhemus Fastscan- se conoce como triangulación activa, basada como se ha visto en la proyección de luz estructurada. Un plano láser es proyectado sobre el objeto a digitalizar, y la intersección de éste con su superficie es una curva plana que será registrada por una cámara digital, que triangulará su posición con la función de mapeado correspondiente (Zagorchev 2006).

Las principales ventajas del equipo son su rapidez y sencillez, el hecho de que pueda digitalizar objetos en movimiento, y su relativo bajo coste. Además permite la exportación de los datos en innumerables formatos estándar en la industria o en experimentación.

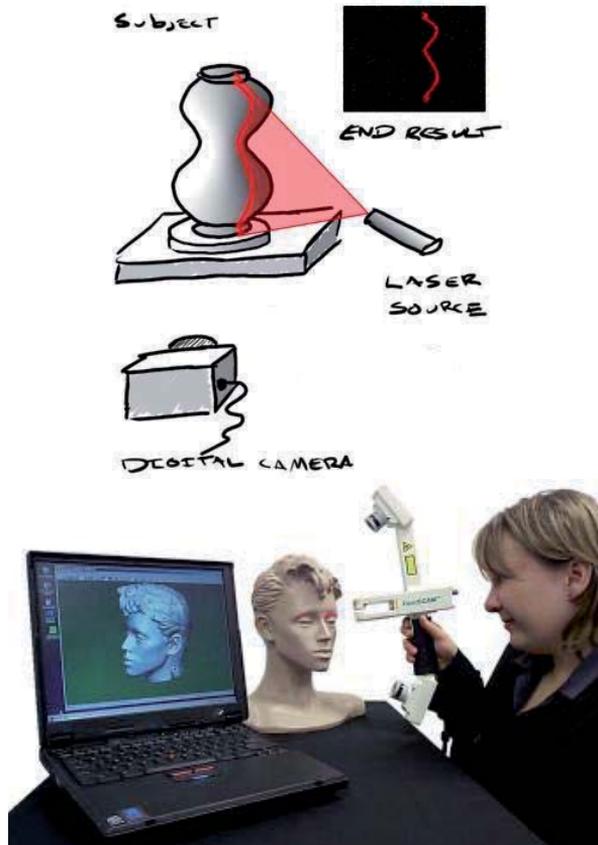


Figura 2.47. Principio de operación el escáner Polhemus 3D.

Entre sus desventajas podemos citar algunos problemas en el postproceso y exportación de datos que se estudiarán más adelante, su precisión relativamente baja -0.5mm-, y la limitación en cuanto al color de los objetos, que debe ser claro, no pudiendo digitalizar superficies rojas ni en general oscuras, metálicas o transparentes.

2.4. Tratamiento de imágenes.

2.4.1. Reconocimiento y concordancia de patrones.

El objetivo de esta tesis doctoral es el uso de herramientas de imagen para medir parámetros geométricos. A lo largo de su desarrollo se empleará de manera

recursiva una herramienta matemática para la extracción de información de las imágenes tomadas por una cámara digital o de video.

Cuando se espera que la información a extraer de un conjunto de datos tenga una determinada forma –o patrón- es habitual emplear técnicas de ajuste de patrones, conocidas habitualmente por su nombre en inglés: ‘pattern match’ o ‘template match’. No deben confundirse con las técnicas de reconocimiento de patrones ‘pattern recognition’, enfocadas a buscar cuál es la estructura de los datos, y no a ajustar los datos a una estructura predeterminada (Gonzalez, 2009).

Se denomina ‘ajuste de patrones’ a las técnicas de ingeniería, computación y matemáticas utilizadas para ajustar un determinado grupo de datos a una estructura patrón. En este trabajo los datos de origen serán líneas, imágenes y superficies, en donde se buscarán patrones en 1, 2 o 3 dimensiones.

Cuando el sensor es una cámara digital y el grupo de datos obtenido una imagen, el objetivo será identificar en ella el objeto fotografiado. Cuando el objeto fotografiado es conocido, se tratará de hacer concordar la imagen obtenida por la cámara con una imagen sintética del objeto en cuestión.

Las técnicas más empleadas para la concordancia de patrones son técnicas de correlación estadística. Su principal ventaja radica en la robustez frente al ruido introducido por el sensor en los datos. El mejor ajuste con el patrón filtrará la información eliminando ese ruido y tiene una gran inmunidad frente al mismo.

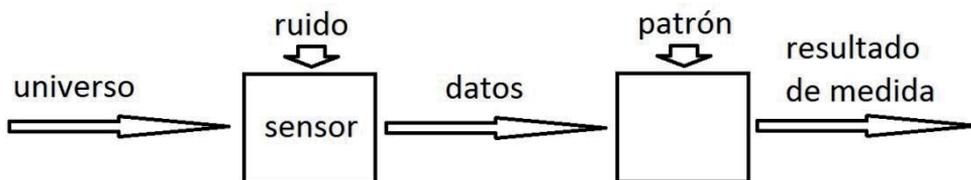


Figura 2.48. Diagrama de flujo de las técnicas de concordancia de patrones.

2.4.2. Correlación cruzada en 1, 2 y 3 dimensiones.

En el procesado de datos se llama correlación cruzada a la medida de la similitud de dos señales, empleada en la concordancia de patrones para encontrar características relevantes de una señal desconocida mediante su comparación con

una que sí se conoce. También se denomina covarianza cruzada o producto escalar desplazado.

El caso más sencillo en una dimensión puede verse en la imagen. Los datos aparecen en azul y el patrón con el que se compararán en rojo.

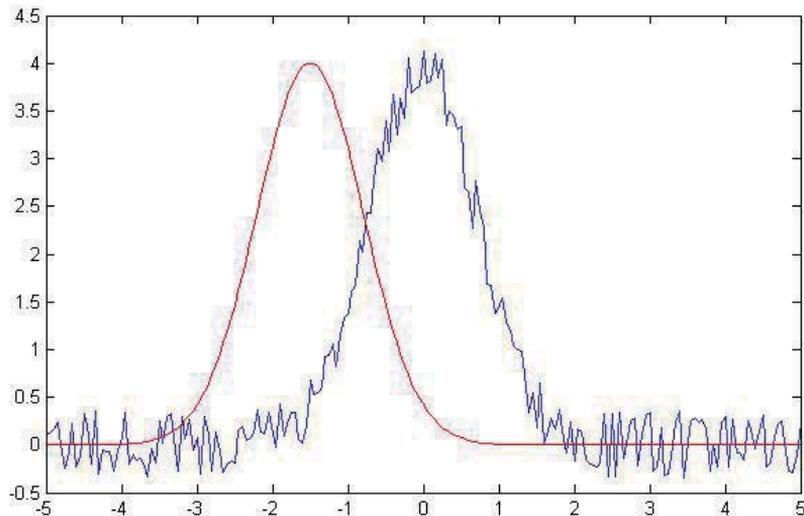


Figura 2.49. Datos experimentales y patrón de ajuste para estudiar su correlación cruzada.

En este caso se está empleando una campana de Gauss como patrón para unos datos que tienen una forma parecida distorsionada por una componente de ruido.

Matemáticamente la correlación cruzada entre las dos funciones es una integral paramétrica de la forma

$$C(\alpha) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x + \alpha) dx \quad [11]$$

Siendo $f(x)$ la función que representa los datos y $g(x)$ la función patrón, que se ha desplazado un valor α en el eje de abscisas. El patrón podrá estar modificado por un parámetro de otros modos. En este caso se ha modificado desplazándolo en el eje de abscisas para ajustar el patrón a los datos en ese eje, buscando el centro de la campana que más se ajuste a esos datos. Habitualmente el resultado de la operación es normalizado para que los datos tengan valores relativos entre 0 y 1.

$$C(\alpha) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x+\alpha) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) dx} \quad [12]$$

La representación gráfica de la función $C(\alpha)$ tiene la forma de la figura siguiente

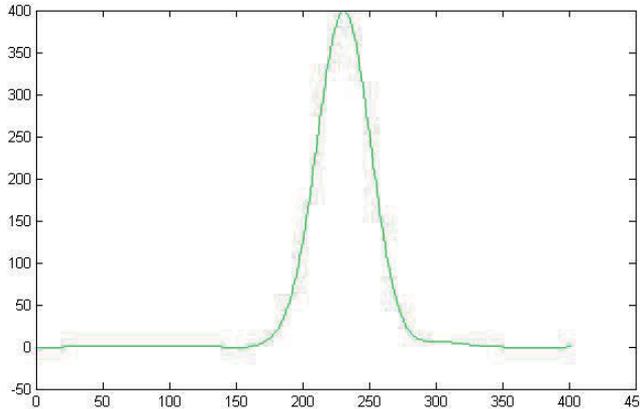


Figura 2.50. Resultado de la integral paramétrica de correlación cruzada.

El ajuste de los datos se hará buscando el máximo de la función $C(\alpha)$. El pico de la función de correlación dará el valor de desplazamiento α que representa el mejor ajuste. Para obtener la posición del pico (y no su valor) no es necesario realizar la normalización ahorrando coste de cálculo.

La forma de la función de correlación $C(\alpha)$ dependerá de la señal original y el patrón con el que la comparamos. Además de la forma gaussiana anterior a lo largo del texto se verán dos ejemplos más: una con forma rectangular, que da como resultado una función de correlación triangular, y otra con forma triangular, que da resulta en una función parabólica. La forma de esta función deberá ser tenida en cuenta a la hora de localizar el máximo.

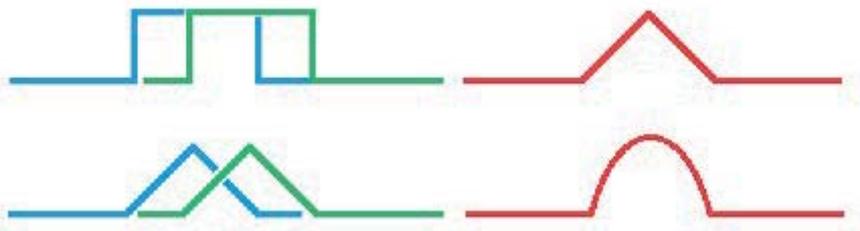


Figura 2.51. Formas posibles de los datos, patrones y resultado de la correlación.

Si los datos tienen dos dimensiones –como en el caso de una imagen digital- o tres dimensiones, en el caso de una superficie, la integral tendrá otras formas y más parámetros. Para conocer la posición en el espacio del patrón que más se ajusta a los datos se formarán integrales con una forma similar a la anterior y se obtendrá el máximo de la función para los parámetros.

$$C(\alpha, \beta) = \iint f(x, y) \cdot g(x + \alpha, y + \beta) dx \tag{13}$$

$$C(\alpha, \beta, \gamma) = \iiint f(x, y, z) \cdot g(x + \alpha, y + \beta, z + \gamma) dx \tag{14}$$

2.4.3. Correlación cruzada discreta.

Los datos obtenidos por un instrumento de medida que quieren ser tratados serán en general datos digitales, series de números que representan una función continua discretizada con un determinado muestreo temporal de periodo T_s .

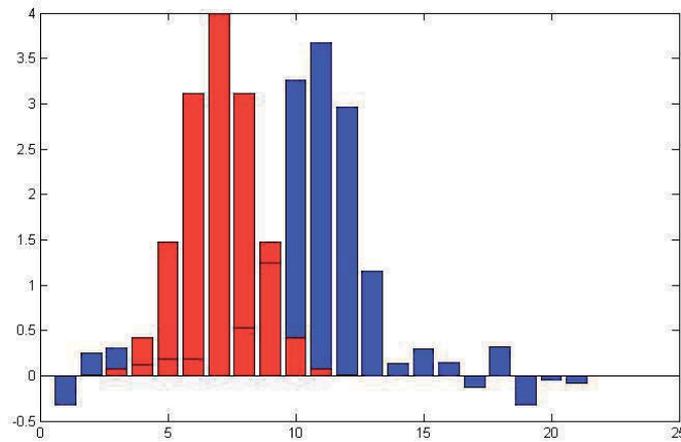


Figura 2.52. Datos experimentales y patrón de ajuste en forma discreta.

Las integrales de correlación anteriores para funciones continuas se transformarán en sumatorios, debiendo ser la función patrón una serie sintética con el mismo muestreo.

$$C_j = \sum_i f_i \cdot g_{i+j} \tag{15}$$

De nuevo se ha prescindido del normalizado para ahorrar coste de cálculo, si bien existen algunas mejoras en los algoritmos que lo reducen significativamente (Briechle 2001).

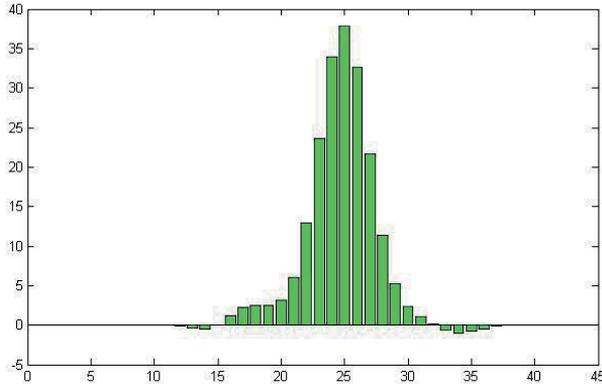


Figura 2.53. Resultado del sumatorio paramétrico de correlación cruzada discreta.

Si se calcula la distancia cuadrática media entre las dos funciones

$$RMS = \sqrt{\sum_i (f_i - g_{i+j})^2} = \sqrt{\sum_i f_i^2 + \sum_i g_{i+j}^2 - 2 \sum_i f_i \cdot g_{i+j}} \quad [16]$$

Puede verse que los dos primeros sumatorios tienen valor constante y por tanto el valor de j que hace máxima la correlación minimiza la distancia RMS demostrando el mejor ajuste posible.

En el caso de funciones en dos o tres dimensiones tendrán una forma análoga. La correlación de una imagen digital tomada por una cámara -dos dimensiones- con una imagen sintética puede verse en las imágenes siguientes. El sumatorio puede extenderse a todo el conjunto de datos o a una ventana más reducida si se espera un valor para el máximo de la función de correlación.

Matlab dispone de una función para realizar directamente este trabajo: 'xcorr'. También pueden emplearse, y en ocasiones será más cómodo, las funciones de convolución 'conv' y 'conv2'. A pesar de que en concepto la correlación cruzada y la convolución sean diferentes, el hecho de que el patrón de comparación sea una función simétrica hace que numéricamente sean iguales.

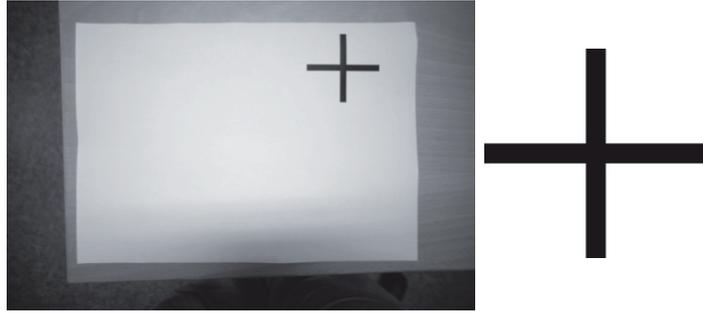


Figura 2.54. Imagen digital obtenida por una cámara y patrón sintético de comparación.

Las funciones de correlación en dos dimensiones continuas o discretas resultan en figuras similares a las siguientes

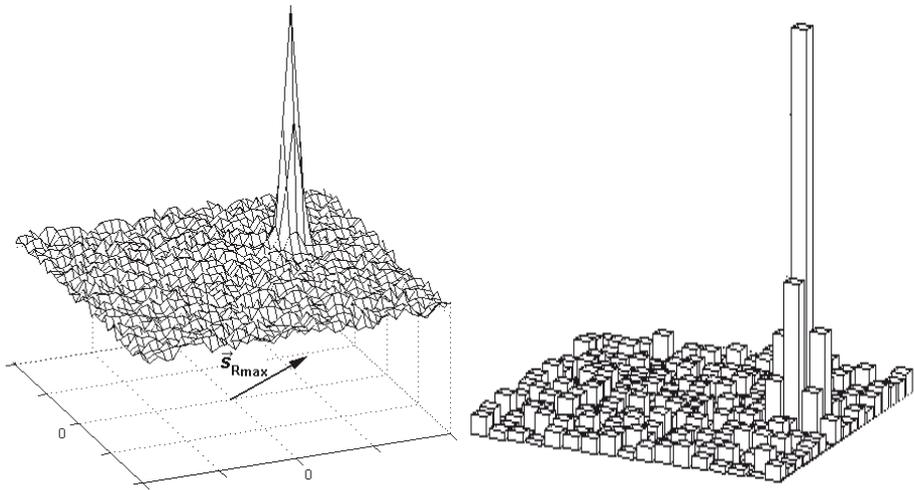


Figura 2.55. Funciones resultado de la correlación cruzada en dos dimensiones.

2.4.4. Obtención del pico de correlación. Interpolación subpíxel.

El paso siguiente a obtener la función de correlación para determinar el mejor ajuste es determinar su máximo. En el caso de la correlación discreta, la función de correlación será una serie de números con lo que obtener el máximo es un algoritmo trivial. Puede derivarse mediante una nueva operación de convolución discreta y buscarse el lugar en que los datos pasan de valores negativos a positivos.

Pero si miramos en detalle una función de correlación discreta, en los datos es evidente que el máximo puede obtenerse con mayor precisión que la discretización hecha en los datos (Bolinder, 1999).

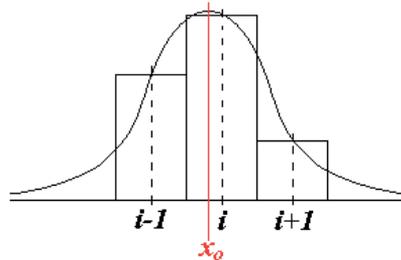


Figura 2.56. Localización del máximo en la función de correlación cruzada.

A pesar de que la información del máximo es discreta, y podría parecer que el pico solo puede estimarse con un error de 1/2 píxel, se trata de información estadística, y los píxeles adyacentes al máximo valor discreto pueden aportar información a la posición real del máximo.

Para ello puede hacerse en el entorno del máximo valor discreto una interpolación polinómica o gaussiana en función de la función de correlación esperada. En general los estimadores que mejor se adaptan a este trabajo son de tres puntos.

Si tomamos este valor máximo discreto C_i y los adyacentes C_{i-1} y C_{i+1} entonces podemos establecer, para la convolución con forma gaussiana la expresión (Weterweel, 2000)

$$x_0 = x_i + d \cdot \frac{\ln C_{i-1} - \ln C_{i+1}}{2 \ln C_{i-1} - 4 \ln C_i + 2 \ln C_{i+1}} \quad [17]$$

Siendo d el intervalo en el que está discretizada la variable x .

Esta misma expresión técnica de ajuste, denominada interpolación subpíxel, podría usarse en 2 y 3 dimensiones. En el caso visto de la correlación de imágenes en 2D con funciones triangulares que se verá en el desarrollo de los experimentos, la integral de convolución tiene forma bicuadrática y puede obtenerse el pico de correlación haciendo el ajuste para los dos ejes.

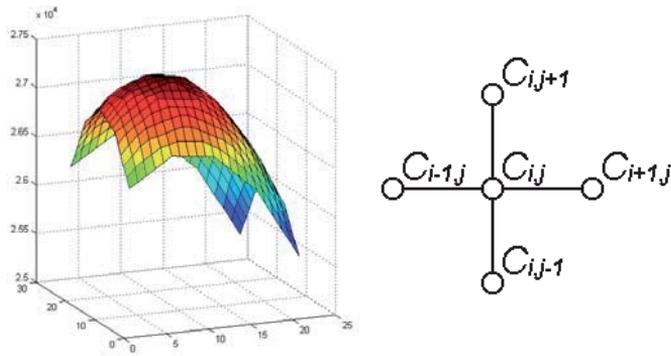


Figura 2.57. Función de correlación parabólica y muestreo para obtención de su máximo.

$$x_0 = x_{i,j} + \frac{C_{i-1,j} - C_{i+1,j}}{2C_{i-1,j} - 4C_{i,j} + 2C_{i+1,j}} \cdot d \quad [18]$$

$$y_0 = y_{i,j} + \frac{C_{i,j-1} - C_{i,j+1}}{2C_{i,j-1} - 4C_{i,j} + 2C_{i,j+1}} \cdot d \quad [19]$$

La interpolación subpíxel en el caso de datos y patrones rectangulares no puede realizarse directamente debido a su función de correlación es triangular sin continuidad de clase C^1 . En el único lugar de la tesis en el que se empleará la convolución de este tipo no será sin embargo necesaria la precisión que da una interpolación subpíxel.

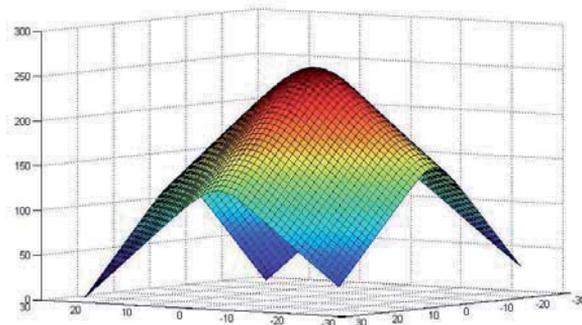


Figura 2.58. Función de correlación triangular correspondiente a datos y patrones rectangulares.

3. Equipos y montajes experimentales

3. Equipos y montajes experimentales.

3.1. Introducción. Resumen de montajes experimentales.

3.2. Escáner comercial. Principios de funcionamiento y adaptación al laboratorio.

3.2.1. Introducción

3.2.2. Adquisición de coordenadas. Triangulación activa.

3.2.3. Posicionamiento global mediante campos electromagnéticos.

3.2.4. Reconstrucción de superficies.

3.2.5. Interfaz de usuario y opciones de exportación.

3.2.6. Modelado de superficies. Conversión a una malla regular.

3.2.7. Equipos auxiliares. Desplazamiento en ejes cartesianos.

3.2.8. Pruebas iniciales.

3.3. Perfiles en dos dimensiones. Restitución de la refracción.

3.3.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción del plano medio

3.3.2. Ensayos de calibración con fondo plano.

3.3.3. Ensayos de calibración con patrón de geometría conocida.

3.3.4. Restitución de la refracción. Obtención de perfiles sumergidos.

3.4. Superficies en tres dimensiones. Restitución de la refracción.

3.4.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción en tres dimensiones.

3.4.2. Elevación y curvado de un fondo plano.

3.4.3. Identificación de puntos coincidentes en una imagen patrón.

3.4.4. Toma de imágenes bajo una lámina de agua.

3.4.5. Restitución de la refracción.

3.5. Perfiles en dos dimensiones. PIV en plano longitudinal.

3.5.1. Introducción. Perfiles de fondo en una imagen PIV.

3.5.2. Localización del máximo de luminancia.

3.5.3. Corrección de la distorsión. Funciones de orden superior.

3.6. Obtención de perfiles con equipos de bajo coste.

3.6.1. Equipos láser y cámaras de bajo coste.

3.6.2. Calibración con un patrón.

3.6.3. Corrección gráfica de la perspectiva. Medidas semicuantitativas.

- 3.6.4. Corrección numérica de la perspectiva. Medidas cuantitativas.
- 3.6.5. Perfiles en un video digital de alta definición.
- 3.6.6. Detección de eventos run-up y run-down.

3.1. Introducción. Resumen de montajes experimentales.

A lo largo de este capítulo se introducirán los diferentes montajes de laboratorio que han sido empleados para medir perfiles o superficies de fondos de sedimentos –y algún otro uso relacionado- con diferentes herramientas, todas ellas basadas en láser e imagen digital.

Tal y como se dijo en el capítulo de introducción, la evolución temporal de la elaboración de esta tesis a lo largo de una década, ha hecho que las herramientas disponibles y las necesidades a resolver en los proyectos del laboratorio hayan ido cambiando.

Los primeros experimentos de esta tesis se dedicaron a establecer si era posible, y en caso afirmativo, en que condiciones, utilizar un escáner 3D comercial bajo el agua. El CITEEC adquirió un modelo Polhemus FastScan después de unas pruebas iniciales con un equipo similar prestado por otro laboratorio de la ETSI Caminos.



Figura 3.1. Escáner comercial Polhemus 3D. Pistola láser y unidad de control

Los primeros trabajos se centraron en este equipo, para conocer su funcionamiento detallado y a continuación a obtener las funciones de transformación en la toma de imágenes por la refracción al observar el fondo de sedimentos bajo una lámina de agua.

Para ello fue necesario:

- Adaptar el equipo a su uso en laboratorio conociendo los factores que afectan a su utilización no convencional y exportando los datos a un formato más conveniente para su análisis (punto 3.2).
- Estudiar la transformación en el plano medio debida a la refracción, para obtener como primera aproximación el perfil central del fondo (punto 3.3).
- Estudiar la transformación completa de toda el área de medida en tres dimensiones (punto 3.4).

Estas herramientas se desarrollaron con un objetivo práctico doble, tal y como se verá en detalle en el capítulo 5:

- Medir el fondo de arena producido por sedimentación aguas arriba de un vertedero de aforo y la modificación de la curva de gasto del mismo.
- Medir la erosión producida en un fondo de arena para validar un modelo numérico de transporte de sedimentos.

Además de demostrar la posibilidad de uso del escáner bajo una lámina de agua fluyente, durante estos experimentos se utilizó de manera conjunta un velocímetro de imagen de partículas (PIV) para medir el campo de velocidades en dos dimensiones. Observando las imágenes del mismo parecía evidente que además del campo de velocidades podía obtenerse más información, en particular la posición de la superficie libre y del fondo de sedimentos en el plano de medida.

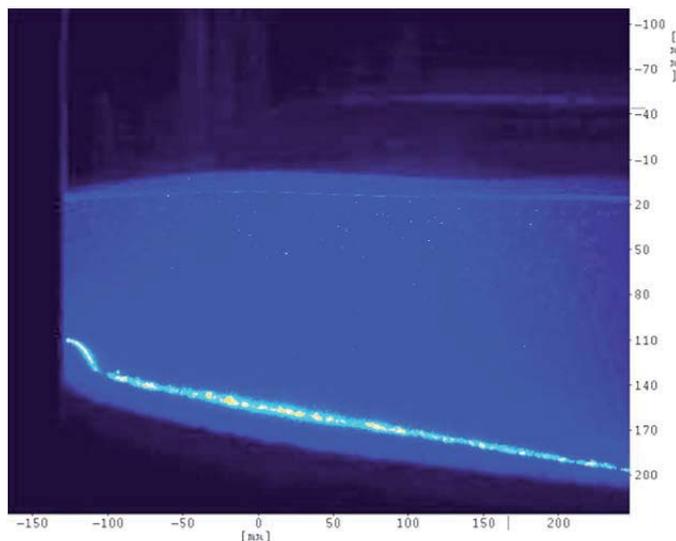


Figura 3.2. Perfil de un fondo de sedimentos iluminado por el láser del PIV (milímetros).

Se trató entonces de desarrollar y validar los algoritmos necesarios para la extracción automatizada de esa información de las imágenes PIV (punto 3.5) con dos motivos diferentes:

- Primero para disponer de la herramienta en futuros ensayos donde no se emplee el escáner para medir el fondo.
- Segundo para tener información redundante con el escáner y reducir el tiempo de calibración del mismo.

Finalmente, y como última parte de los montajes experimentales, se trató de utilizar los conocimientos adquiridos y las herramientas desarrolladas para tratar de hacer las mismas medidas o bien otras similares, con un equipo de mucho menor coste (punto 3.6).

Para ello se sustituyeron los láseres científicos del escáner y el PIV por un equipo de nivelación de albañilería, y las cámaras de los mismos equipos por cámaras fotográficas convencionales. Este cambio supuso desarrollar y validar procedimientos de calibración para pasar de las imágenes (en píxeles) a unidades físicas, así como otros para automatizar la extracción de información de las imágenes o video.



Figura 3.3. Láser de nivelación de albañilería y cámara digital comercial.

El desarrollo final de estos montajes se hizo para satisfacer las necesidades de dos proyectos concretos, uno de medida de perfiles transversales de diques de escollera sometidos a la acción del oleaje, y otro para la medida de la evolución de un perfil de playa en la zona que es alternativamente cubierta y descubierta con cada ola.

3.2. Escáner comercial. Principios de funcionamiento y adaptación al laboratorio de hidráulica.

3.2.1. Introducción. Polhemus FastScan

Para los dos primeros montajes de este capítulo se utilizó un escáner comercial adquirido por el CITEEC. El modelo concreto es un FastScan del fabricante norteamericano Polhemus. Se trata de un sistema comercial cerrado, que actúa a modo de caja negra entregando un archivo de salida con la superficie medida, pero no permite acceder a los datos en bruto en ningún paso intermedio.

Para su correcta utilización, y más aún pensando en el uso no convencional que se hará dentro del agua, es imprescindible conocer su funcionamiento, sus parámetros de configuración, sus posibilidades y sus limitaciones.

Los principales componentes del sistema son una unidad de proceso, de tamaño aproximado a un ordenador de sobremesa, y una pistola ligera para ser manejada

a mano (el fabricante la denomina ‘magic wand’, varita mágica) que cuenta con el emisor láser y dos cámaras digitales.

Ésa es su principal diferencia respecto a otros equipos comerciales, la posibilidad de sostener manualmente el digitalizador, que en otros casos va montado sobre algún tipo de bastidor. Sin embargo, aunque esta posibilidad pueda ser muy interesante en algunos casos, la particularidad del uso que se hará aquí requerirá el montaje en un dispositivo de traslación lineal.

El principio de operación es sencillo, haciendo un barrido con la pistola por las proximidades del objeto de un modo similar a la pintura con spray. Un emisor de luz láser roja proyecta un haz en forma de abanico, dibujando una línea sobre la superficie a digitalizar que marca el contorno de la misma. Esta línea es registrada en dos cámaras situadas a ambos lados del haz.

Desplazando manual o automáticamente el equipo sobre toda la superficie se registran todos los puntos que ilumina el láser. El empleo de dos cámaras permite obtener información redundante y ver zonas que por la perspectiva quedan ocultas a alguna de ellas. Un sistema de bobinas que emiten y reciben campos electromagnéticos permite conocer la posición en el espacio de la pistola respecto a una referencia fija y así establecer para los puntos coordenadas absolutas en el espacio.



Figura 3.4. Forma de utilización de la pistola del Polhemus FastScan.

3.2.2. Adquisición de coordenadas. Triangulación activa.

El proceso de digitalización de superficies del escáner 3D es del tipo descrito en la sección 2.3.1. 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 trabajo no es el estudio de los algoritmos de adquisición y reconstrucción (Lodha, 1999 y Savchenko, 1995), sino la aplicación del equipo para digitalizar objetos bajo una lámina de agua. En el caso que nos ocupa, además, una tercera fase deberá deshacer la transformación introducida por la refracción de la luz en la superficie del agua.

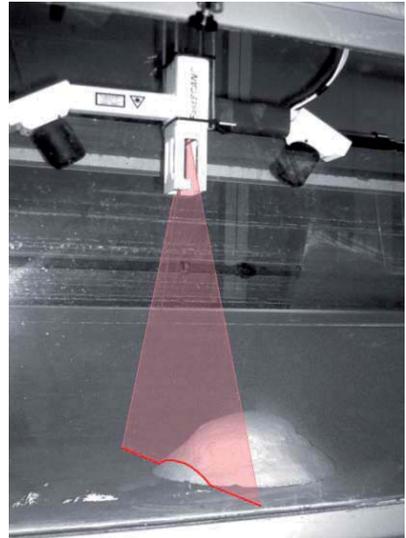
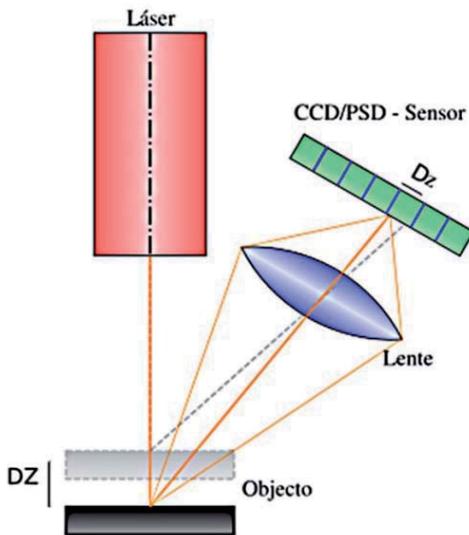


Figura 3.5. Triangulación activa para la obtención de coordenadas.

En el uso convencional del equipo, 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.

De la información redundante de las dos imágenes se obtiene la posición relativa de la línea respecto a la pistola. Además en función de la inclinación de la superficie a digitalizar respecto del plano láser, ésta podría quedar oculta a una de las cámaras. En el proceso normal de digitalización descrito en el manual del fabricante puede hacerse una segunda pasada por la misma zona. Sin embargo esto no será posible en un proceso automatizado sin acceso a los datos, por lo que la segunda cámara representa una ventaja sobre sistemas con una única perspectiva.

El proceso de triangulación con una fuente de luz estructurada se describe en las siguientes figuras y fórmulas matemáticas. En los capítulos siguientes se utilizará el mismo esquema geométrico para conocer cómo afecta la refracción a la toma de imágenes.

Conocida la distancia c entre el centro óptico de la lente de la cámara y el haz láser, para el plano xz pueden escribirse las expresiones

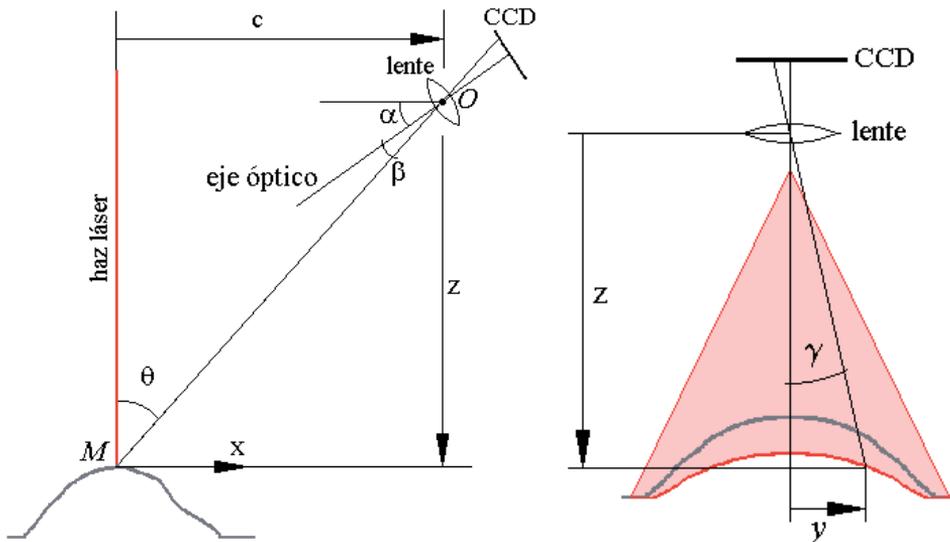


Figura 3.6. Descripción geométrica de las variables de la triangulación activa.

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \quad [20]$$

$$z = \frac{c}{\tan \theta} \quad [21]$$

$$y = \frac{z}{\tan \gamma} \quad [22]$$

en donde:

- O es el centro óptico de la lente
- M es el punto de la superficie cuyas coordenadas se pretende medir
- θ es el ángulo que forma el haz láser con la línea \overline{MO} .
- α es el ángulo que forma el eje óptico de la lente con el eje x , que es una constante geométrica.
- β es el ángulo que forma el eje óptico de la lente con la línea \overline{MO} , que puede medirse en el plano de la imagen formada en el CCD de la cámara, en función de la distancia focal de la lente.

En el otro plano, la posición y se determinará una vez obtenida esta coordenada z y el ángulo γ obtenido en la imagen de la cámara.

3.2.3. Posicionamiento global mediante campos electromagnéticos.

Las coordenadas de los puntos en la fase de adquisición se obtendrán por las cámaras en unos ejes (x,y,z) relativos a la pistola, y mediante la posición en el espacio de ésta, se tendrán las coordenadas absolutas (X,Y,Z) .

La posición de la pistola en el espacio se obtiene mediante la emisión por parte de un objeto fijo de tres campos electromagnéticos perpendiculares que llegan a un receptor situado en la pistola, también con tres bobinas perpendiculares. El sistema está utilizando por tanto *técnicas de medición de distancia*. El análisis de esos campos permite obtener la posición absoluta de la pistola en el espacio y su orientación (y por tanto los seis grados de libertad que definen la posición de un sólido rígido), y con la información de la posición relativa de los puntos respecto a la misma, obtener la posición absoluta de los puntos de la línea iluminada por el láser.

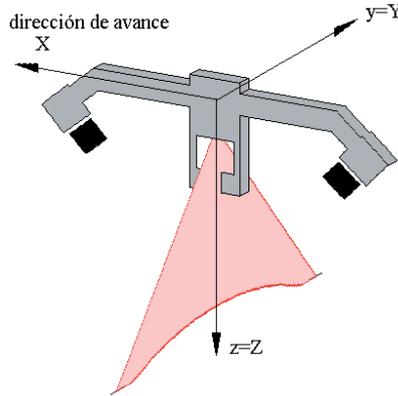


Figura 3.7. Ejes coordenados locales y globales de las coordenadas de los puntos escaneados.

De este modo, los puntos $(0,y,z)$ en las coordenadas relativas al receptor de la pistola ($x=0$ por corresponder todos al plano del haz láser) sufrirán una traslación y un giro en el espacio en función de la posición relativa del emisor y el receptor. En el montaje experimental se dispondrán con los ejes paralelos y la pistola se desplazará para el barrido en la dirección del eje x , por lo que las coordenadas y,z únicamente sufrirán una traslación constante.

Todo este proceso de cálculo está oculto al usuario, que obtiene directamente los puntos de la superficie en sus coordenadas absolutas respecto de una referencia prefijada por la posición del emisor. Al desplazar la pistola haciendo un barrido como si se estuviera pintando con un spray, se obtiene toda la superficie en forma de nube de puntos.

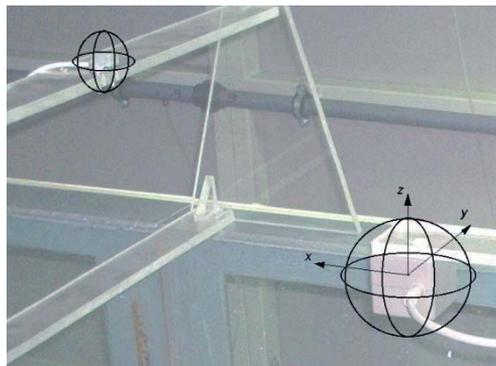


Figura 3.8. Situación en el espacio de las bobinas electromagnéticas de posicionamiento.

El emisor tiene las citadas tres bobinas electromagnéticas perpendiculares entre sí, emitiendo cada una un campo de diferente frecuencia. Los receptores, uno en la pistola y uno para fijar al objeto a digitalizar, reciben las señales de estos tres campos de nuevo en tres bobinas ortogonales y mediante la medida de la intensidad de cada uno de los campos de las tres frecuencias calcula la posición y la orientación en el espacio del receptor. La distancia máxima entre el emisor y cada uno de los receptores de acuerdo con las especificaciones del fabricante es de un metro.

El sistema puede operar con dos posibles modos de funcionamiento, configurables en el software del equipo

- ‘Transmitter is Reference’: en este modo de funcionamiento el segundo receptor se desactiva y únicamente el de la pistola toma referencias espaciales. Se empleará cuando el objeto a digitalizar está fijo.
- ‘Receiver is Reference’ en este modo de funcionamiento la referencia es el segundo receptor, que debe mantener su posición respecto al objeto a digitalizar, esté fijo o no. Puede utilizarse para objetos en movimiento o bien para aumentar el rango de medida, disponiendo de hasta dos metros de receptor a receptor con el emisor en el punto medio.

El hecho de que el sistema de posicionamiento sea de esta naturaleza implica dos condicionantes fundamentales al montaje experimental:

- El sistema debe alejarse de las fuentes de radiación electromagnética para evitar interferencias. En el caso de monitores de ordenador esta distancia mínima se establece en un metro en el manual del equipo.
- El sistema debe alejarse de grandes masas de material ferromagnético, en el caso particular que nos ocupa de la estructura del canal de estudios hidráulicos del laboratorio.

3.2.4. Reconstrucción de superficies. Opciones de exportación.

El software del equipo permite ver en pantalla el objeto según se va digitalizando en forma de puntos, y una vez terminado realiza los cálculos para exportar la superficie como una malla de triángulos en el espacio. El programa puede opcionalmente mostrarla como una superficie de contornos suaves con sombras, pero para exportarla en forma de polinomios de interpolación (NURBS) deberá emplearse un programa como Raindrop Geomagic Studio u otro similar. El fabricante ofrece en opción un módulo de interpolación basado en las RBF, 'radial basis functions'.

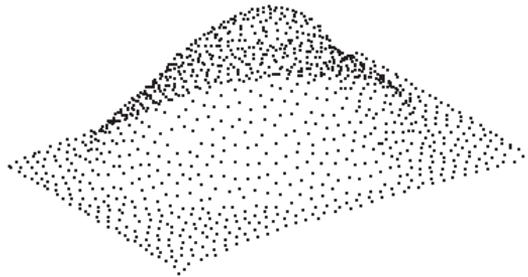


Figura 3.9. Malla de puntos obtenida por el escáner.

En nuestro caso se exportarán los datos a una malla de triángulos y ésta se convertirá a un formato más conveniente utilizando una aplicación programada en Matlab. Cuando se digitaliza la superficie del lecho en dos instantes, las mallas de triángulos serán diferentes en ambos casos, por lo que no se podrán comparar para ver su evolución en el tiempo. Un formato que permite esto es el cambio a una malla regular cuadrada en el plano xy.

En la fase de reconstrucción, complejos algoritmos transforman la nube de puntos en una superficie, exportada en forma de malla de parches triangulares. El programa debe discriminar los puntos que coinciden en el barrido, y hallar medias de forma que estos se puedan representar por triángulos.

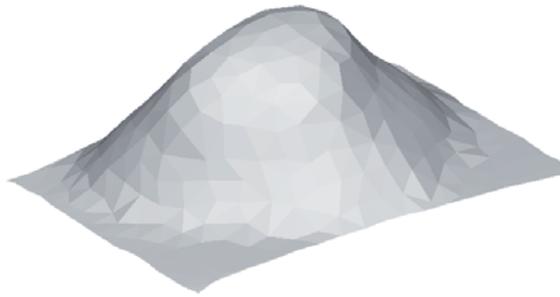


Figura 3.10. Superficie representada por una malla de parches de triángulos.

El usuario establece los parámetros para esta exportación, pudiendo definir el tamaño de la malla de triángulos generados y el suavizado, de manera que las variaciones en la curvatura de la superficie se representen de manera más o menos ajustada.

El objetivo de este trabajo de investigación no es el estudio de los algoritmos de adquisición y reconstrucción, sino la aplicación del equipo para digitalizar objetos bajo una lámina de agua, por lo que no se profundizará en los mismos, si bien si se hará una pequeña introducción al modelado geométrico de superficies.

La aproximación de una superficie por un modelo matemático que la represente puede hacerse de manera global cuando ésta es muy sencilla –esferas, cilindros por ejemplo-. Sin embargo, cuando es muy complicada, se recurre a su división en subdominios y a aproximar matemáticamente cada uno de ellos. Las formas más comunes de hacerlo son mediante polígonos planos, generalmente triángulos por sencillez, o bien polinomios interpolación o funciones racionales NURBS (Non Uniform Rational Base Splines).

La aproximación de una superficie más sencilla puede hacerse por medio de triángulos –*parches*- que se unen en los vértices, cada uno de los cuales representa la nube de puntos localmente en un sentido estadístico. Un método de cálculo sencillo podría ser un ajuste por mínimos cuadrados. Si el plano del triángulo se separa mucho de la nube de puntos, el algoritmo supondrá que el subdominio tiene excesiva curvatura y lo dividirá de nuevo en varios triángulos, para volver a calcular el que más se aproxima. El algoritmo para la partición de la superficie está basado en los trabajos de Voronoi y Delaunay (Fang, 1995).

La continuidad entre los subdominios en este caso es de clase C^0 , es decir, continuidad respecto a las funciones, pero no respecto de sus derivadas. Para obtener un mayor grado de continuidad debe recurrirse a polinomios de mayor orden que los necesarios para representar un triángulo plano.

El formato original de datos exportado por el software de Polhemus FastScan en el formato de Matlab es una malla irregular de triángulos. Si se emplea la opción 'triangle mesh' al exportar, el archivo generado incluye una variable de texto – Info- con información general (fecha, hora...) y dos archivos de datos: Points y Facets.

Points es una matriz de tres filas en la que cada columna corresponde a las coordenadas de un punto en el espacio.

Facets es una matriz de tres filas en la que cada columna indica los puntos que son vértices del triángulo que forma una cara. Estos tres números hacen referencia a las filas correspondientes de la matriz Points. Un ejemplo extraído de una imagen real podría ser el de abajo (representados únicamente los diez primeros puntos y caras)

Points

239,0	237,6	244,6	248,4	252,1	250,6	237,4	258,7	237,6	267,5
-114,8	-109,1	-115,8	-116,3	-115,6	-106,8	-98,0	-115,3	-88,2	-115,5
565,8	565,3	566,0	566,0	566,1	565,3	565,0	566,2	564,9	566,4

Tabla 3.1. Matriz de puntos con sus coordenadas en el espacio.

Facets

3	6	3	4	6	5	6	8	6	10
1	1	6	6	2	6	7	6	17	8
6	2	4	5	7	8	17	12	21	12

Tabla 3.2. Matriz de caras con los vértices de cada triángulo.

En el menú View>Export Surface Controls puede verse la ventana siguiente

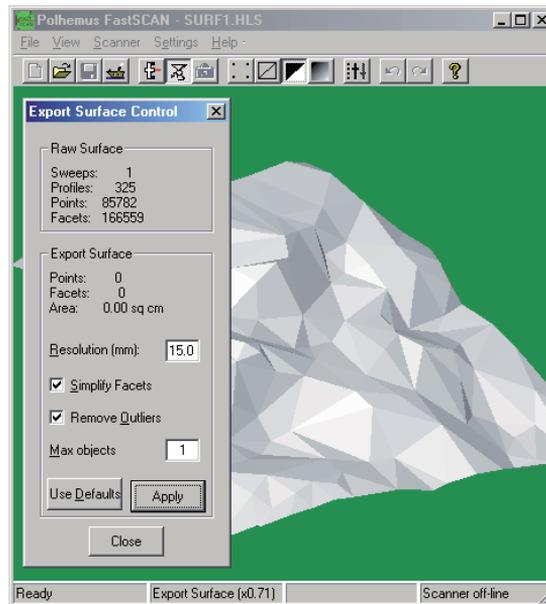


Figura 3.11. Menú de Polhemus FastScan para exportar la superficie de triángulos.

En ella aparecen las opciones de exportación de la superficie, que se definen por el tamaño de la malla de triángulos, expresada como su resolución en milímetros, y por la opción de simplificar las caras. Esta última, si no está activa, generará una malla regular, y si se emplea, generará una malla adaptativa, con mayor resolución en las zonas donde la curvatura es mayor, y menor número de parches donde la superficie se asemeja más a un plano.

Esta segunda opción implica un mayor coste de cálculo de la malla de triángulos, pero como contrapartida empleará un menor número de triángulos (y por tanto menor capacidad de almacenamiento) para representar la superficie.

En el menú File>Export puede verse esta otra ventana

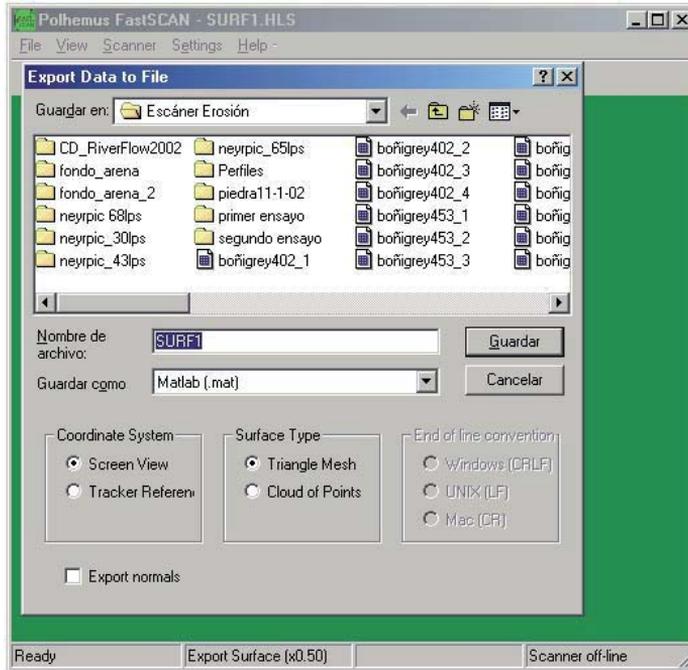


Figura 3.12. Menú de Polhemus FastScan para guardar el resultado de la exportación.

En la persiana ‘Guardar como’, se seleccionará la opción Matlab, y en el tipo de superficie ‘Triangle Mesh’ para exportar los datos al formato citado.

3.2.5. Modelado de superficies: conversión a una malla regular.

Las superficies del lecho erosionable que se estudiarán en este trabajo tienen una particularidad importante que hará su tratamiento más sencillo, y es que son convexas de forma que a cada punto del plano horizontal xy le corresponde una única altura z , debido a que la superficie estudiada que es un lecho fluvial de sedimento no cohesivo. Cuando se digitaliza la superficie del lecho en dos instantes, las mallas de triángulos serán diferentes en ambos casos, por lo que no se podrán comparar de manera sencilla para ver su evolución en el tiempo. Un formato que permite esto es el cambio a una malla regular cuadrada.

Para pasar a una malla regular en un plano xy se generará una distribución regular de puntos en el plano y se hará corresponder una altura z a cada uno de ellos.

Para obtener esta altura será necesario identificar en cuál de los triángulos está el punto y después interpolar la componente z en el mismo. Este proceso se dividirá en dos pasos:

Paso 1: Identificar el triángulo de la malla original que contiene cada punto de la nueva malla regular

El algoritmo para determinar si un punto es interior o no a un triángulo (que se utilizará recursivamente) incluye un cambio de coordenadas en el plano a un espacio ortonormalizado de acuerdo con el siguiente dibujo.

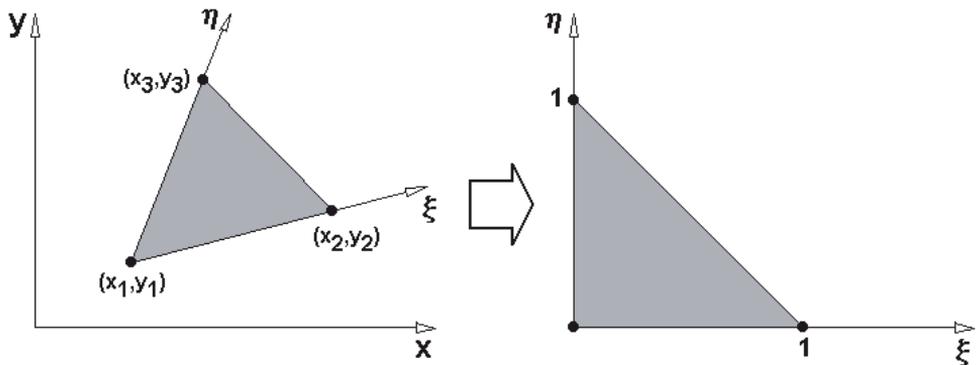


Figura 3.13. Conversión de coordenadas a un espacio ortonormalizado.

El cambio de coordenadas de un punto (x,y) puede hacerse como

$$\begin{Bmatrix} \xi \\ \eta \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \end{Bmatrix} \quad [23]$$

en las nuevas coordenadas (ξ, η) , la condición de punto interior al triángulo es ahora

$$\xi > 0 \quad \eta > 0 \quad \xi + \eta < 1 \quad [24]$$

El programa además incluye una serie de mejoras de cálculo que harán que esta condición se utilice de forma selectiva, y no en todos los triángulos para cada punto de la malla regular.

Paso 2: Una vez determinado el triángulo al que pertenece cada punto de la nueva malla regular en xy , será necesario interpolar la coordenada z en el mismo, del siguiente modo:

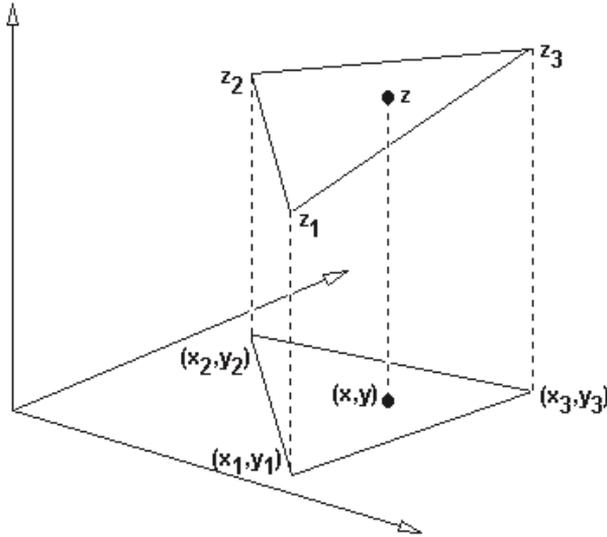


Figura 3.14. Interpolación de la coordenada z dentro de un triángulo.

$$z = (z_1 \quad z_2 \quad z_3) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{Bmatrix} \quad [25]$$

Otro modo más sencillo, que además ahorra coste de cálculo en el nuevo sistema de coordenadas es:

$$z = (z_1 \quad z_2 \quad z_3) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ \xi \\ \eta \end{Bmatrix} = (z_1 \quad z_2 \quad z_3) \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 1 \\ \xi \\ \eta \end{Bmatrix} =$$

$$= z_1 \cdot (1 - \xi - \eta) + z_2 \cdot \xi + z_3 \cdot \eta$$

[26]

El programa de Matlab que lee los archivos generados por el software del Polhemus (con las variables Points y Facets), y convierte la malla triangular a una malla regular es **polhemus.m**. En las imágenes siguientes puede observarse un ejemplo de la conversión realizada

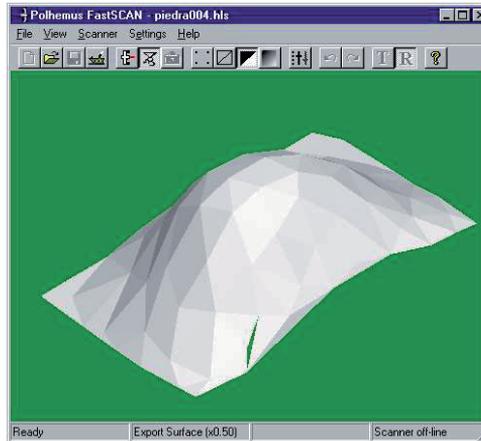


Figura 3.15. Imagen de la malla de triángulos exportada por el software.

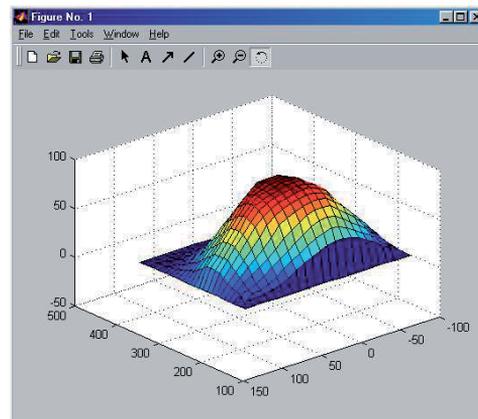


Figura 3.16. Imagen convertida a una malla rectangular en el plano horizontal.

3.2.6. Equipos auxiliares. Desplazamiento en ejes cartesianos.

Una de las condiciones necesarias para controlar la refracción del haz láser al introducirse en la lámina de agua es conocer su dirección en el momento de

tomar la imagen. Para ello se ha decidido mantener la posición perpendicular del mismo respecto al fondo del canal y desplazarlo de manera paralela a su eje.

El equipo para realizar este movimiento de forma automatizada es un bastidor robotizado controlado por ordenador, del fabricante Techno-Isel. El brazo que une la pistola al mismo se ha realizado de madera para evitar las interferencias electromagnéticas con el FastScan.



Figura 3.17. Bastidor robotizado para el desplazamiento del escáner.

En el extremo opuesto se ha situado el receptor para operar en el modo 'Receiver is Reference'. Después de probar ambos modos se ha comprobado que en este se producen menores interferencias por parte de la estructura de acero del canal, al disponerse el receptor en un pequeño soporte de metacrilato elevado sobre la misma. Por el mismo motivo el soporte de la pistola se ha fabricado de madera.

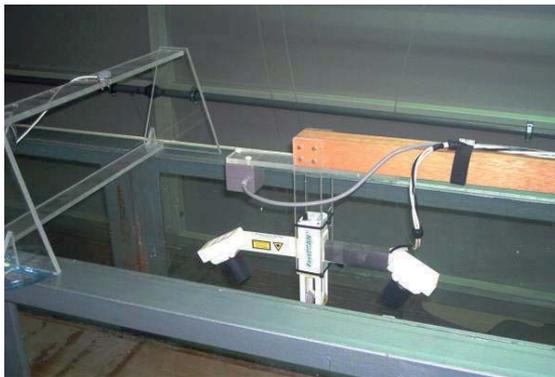


Figura 3.18. Soporte para el receptor de localización del escáner.

Para la medida de calados de agua, que como se verá es necesaria para deshacer la transformación que introduce la refracción en el haz láser, se ha empleado una sonda de ultrasonidos. Se trata del modelo LIT25 de la firma Greyline Inc. y sus características son las siguientes:

- Precisión 0,25% del fondo de escala o 2mm, linealidad 0,1%.
- Display de cuatro dígitos.
- Salida analógica proporcional a la medida.
- Banda ciega de 40 cm.

La precisión observada en pruebas previas se reveló incluso mayor, del orden de 0,5 milímetros comprada con un limnómetro de punta con precisión de 0,1 milímetros.



Figura 3.19. Sonda de calados Greyline LIT25.

3.2.7. Pruebas iniciales.

Las condiciones antes citadas para el montaje se establecieron tras la realización de unas pruebas previas, algunas de las cuales es necesario repetir antes de cada batería de ensayos como parte del procedimiento de calibración.

La disposición de los equipos de posicionamiento electromagnéticos sobre el canal se probó en muy diferentes configuraciones. Se ensayaron los modos *Transmitter is Reference*, y *Receiver is Reference*, con el segundo receptor como referencia, tomando la última posibilidad finalmente, con el emisor unido solidariamente al brazo del posicionador. Se probaron también muchas posiciones para el receptor que sirve como referencia hasta dar con la óptima

final, elevada por encima del canal por medio de un puente de metacrilato. En esta configuración, sin embargo, el rango de movimiento es limitado. La amplitud máxima de un metro dada por el fabricante del equipo no se alcanza debido a las interferencias con la estructura de acero del canal. Este hecho es fácilmente observable al medir la superficie del fondo del canal y ver el alabeo de la imagen tomada por el FastScan.

En el soporte de metacrilato se ha incluido además un transportador de ángulos para garantizar que la referencia que supone el segundo receptor sea paralela al fondo del canal. Para ello deben realizarse mediciones de éste, previas a cada batería de ensayos. La posición óptima en alejamiento respecto de la pistola y ángulo se reflejará en una imagen plana y horizontal de la superficie, con medidas que tendrán una componente de ruido inferior a la precisión del equipo ($\pm 0,5\text{mm}$). Las imágenes muestran el ruido obtenido en la imagen del fondo y su representación exportado al entorno Matlab. En la segunda es necesario observar el escalado de alturas en el eje z, mucho mayor que el que corresponde a la dimensión en planta.

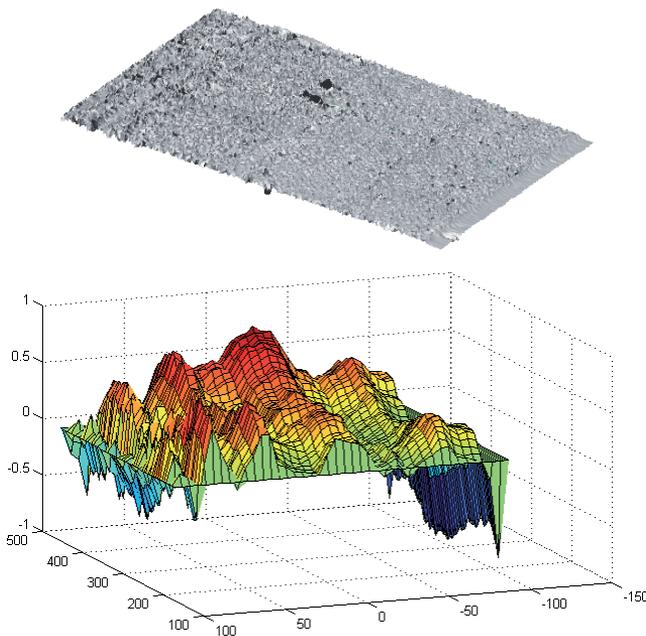


Figura 3.20. Imagen de calibración del fondo plano del canal (milímetros).

Una de las dificultades mayores a la hora de realizar todos los ensayos ha sido la obtención de una lámina de agua con una superficie regular y estable, que permita una refracción controlada. Para ello se ha dispuesto en la entrada del canal una estructura de tubos en panel de abeja que garantiza la bidimensionalidad del flujo. La pérdida de carga en estos tubos provoca que exista mayor altura de lámina a la entrada, y el agua que circula por los tubos superiores cae sobre la lámina provocando una perturbación de nuevo en la superficie. La solución que se ha probado con éxito para este problema es inclinar los tubos para que la pérdida de carga en ella coincida con la diferencia de altura entre la entrada y la salida.

Otra posible solución a considerar en un futuro para obtener una refracción controlada del láser al entrar en el agua, es disponer un cristal sobre la superficie, pero debe estudiarse en detalle la modificación que esto introduce en el flujo. En general, esto podrá hacerse únicamente en los ensayos de calibración con un patrón que no varíe al hacer modificaciones en la hidrodinámica.

Una dificultad añadida al realizar las medidas bajo la lámina de agua es la turbidez de la misma. El sistema de aporte al canal cuenta con elementos de acero, que al oxidarse la ensucian hasta impedir la visión por completo. Ha sido necesario en varias ocasiones renovar el circuito para que las cámaras pudiesen tomar la imagen de láser en el fondo de arena.

3.3. Perfiles en dos dimensiones. Restitución de la refracción.

3.3.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción en el plano medio.

La figura 3.6. capítulo 3.2.2 para explicar la triangulación activa deja de ser válida cuando la superficie a medir se encuentra bajo una lámina de agua, siendo necesario tener en cuenta las transformaciones ópticas debidas a la refracción.

Cuando el plano de luz láser atraviesa la superficie del agua o cuando las cámaras observan la línea que proyecta sobre los objetos bajo esa misma lámina de agua, la refracción introduce una distorsión en la medida que debe ser tenida en cuenta.

En una primera aproximación se estudiará únicamente el plano medio y con una superficie libre paralela al fondo. Esto hace que la única refracción que se produce sea la correspondiente a la imagen de la línea del láser marcando el contorno del objeto. En estas condiciones, el problema de la elevación virtual del fondo del canal debida a la refracción puede esquematizarse según la siguiente figura.

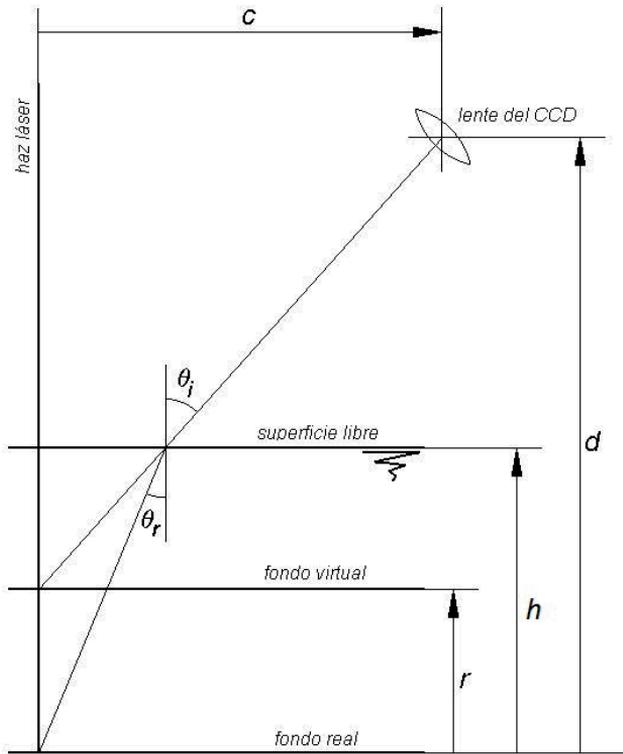


Figura 3.21. Transformación introducida por la refracción en las medidas del escáner.

De acuerdo con ella pueden establecerse las siguientes relaciones trigonométricas:

$$(d - h) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) + h \cdot \operatorname{tg}(\theta_r) = c \quad [27]$$

$$(d - r) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) = c \quad [28]$$

en donde se ha establecido la notación siguiente

- c es un parámetro geométrico que define la posición del centro óptico del sistema de imagen respecto del plano láser.
- d es la coordenada z real del fondo del canal
- h es la altura de lámina de agua.
- r es la elevación virtual del fondo del canal.
- θ_i, θ_r son los ángulo incidente y refractado

tomando de nuevo la ley de Snell

$$r_i \cdot \text{sen}(\theta_i) = r_r \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad [29]$$

que en el caso del aire y del agua puede expresarse como

$$\text{sen}(\theta_i) = 1.333 \cdot \text{sen}(\theta_r) \quad [30]$$

introduciendo esta última expresión en [27] se tiene la ecuación no lineal

$$(d - h) \cdot \text{tg}(\theta_i) + h \cdot \text{tg}\left(\arcsen\left(\frac{\text{sen}(\theta_i)}{1.333}\right)\right) = c \quad [31]$$

el programa de Matlab **refraccion.m** resuelve la ecuación por el método de la bisección, introduciendo como datos c, d y h . Con el ángulo θ_i se obtiene ahora la elevación r como

$$r = d - \frac{c}{\text{sen}(\theta_i)} \quad [32]$$

La siguiente figura muestra gráficamente esta elevación r respecto a la altura de lámina h para unos valores de $c=250$ y $d=790$. El primero se ha obtenido de las especificaciones del fabricante (distancia del centro óptico de la lente al plano láser) y el segundo (altura del centro óptico de la lente sobre el fondo del canal) se ha medido con una cinta métrica.

La curva muestra claramente una tendencia lineal en el primer tramo, que es el interesante desde el punto de vista de los experimentos que se han desarrollado en este trabajo.

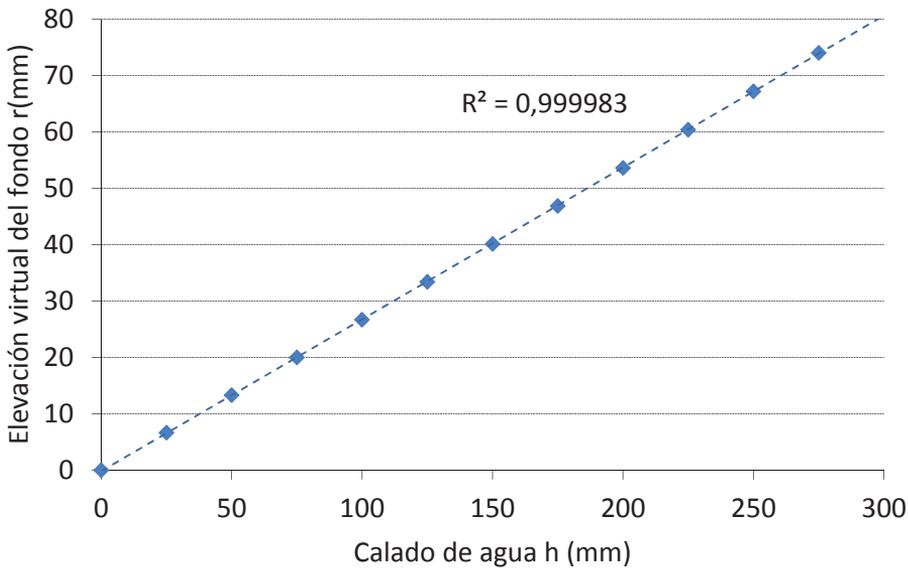


Figura 3.22. Elevación teórica r (mm) del fondo en función del calado y (mm).

Como puede observarse en el gráfico la relación es de nuevo muy aproximadamente lineal y casi independiente del calado. Estas dos circunstancias se observaron en los experimentos realizados para calibrar el equipo.

3.3.2. Ensayos de calibración con fondo plano.

En este apartado se profundiza en el estudio de las mediciones con fondo plano. Se realizaron varios barridos para garantizar la repetibilidad de las medidas, y se llevó a cabo un estudio estadístico de los datos, que se mostraron altamente precisos. Centrando el análisis en la línea media del haz láser, que no sufre refracción en el plano xy , el único efecto es la elevación r del fondo desde su posición real. Los valores medios de las cuatro medidas son ahora calculados y presentados frente al calado y . La figura incluye también una comparación con los resultados teóricos de elevación r respecto de y calculados en el apartado anterior. Como puede observarse, la tendencia de la curva en ambos casos es lineal ($r^2=0.99975$ para los datos experimentales) en todo el rango de la experimentación desarrollada con el escáner.

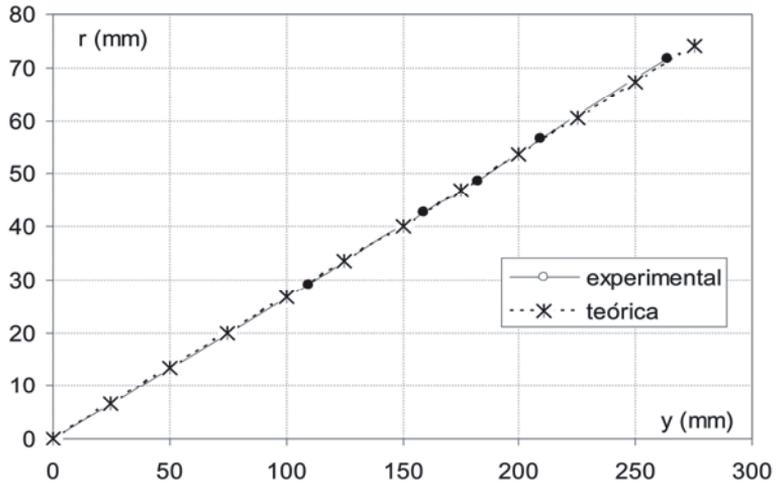


Figura 3.23. Comparación teórico - experimental de la elevación virtual del fondo.

Las desviaciones r' de las medidas del fondo del canal respecto de su elevación promedio están en casi todos los casos por debajo de los 0.3 milímetros, tal como se puede ver en la figura siguiente. De esta forma podemos enunciar que el escáner registró el perfil del fondo con una precisión muy alta, incluso con el calado mayor de 322 milímetros.

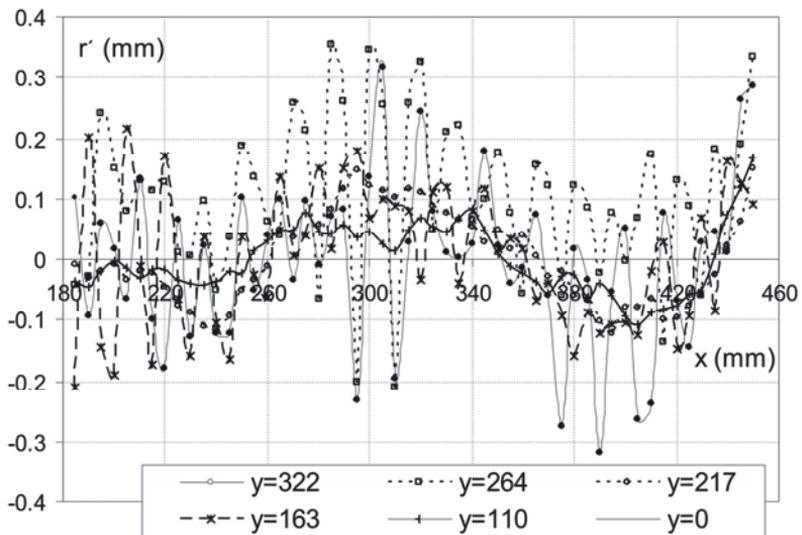


Figura 3.24. Desviación de las medidas del perfil del fondo respecto de su valor medio para cada calado

En la figura pueden observarse además unas oscilaciones que se estudiarán en el capítulo 4 de análisis de datos y que representan un error de medida producido por una ondulación de la superficie libre.

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.

3.3.3. Ensayos de calibración con patrón de geometría conocida.

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.

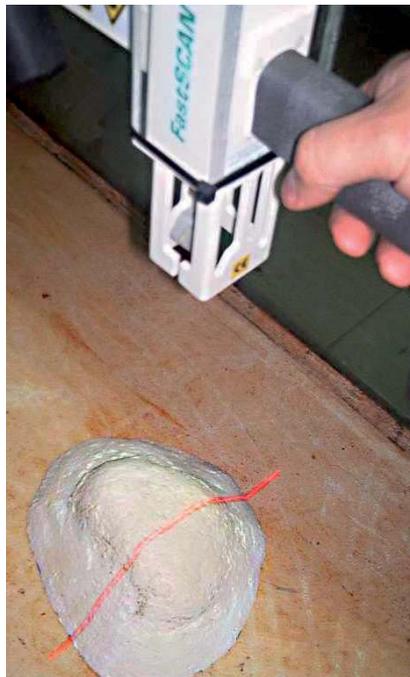


Figura 3.25. Escaneado del objeto patrón sin agua.

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 siguiente.

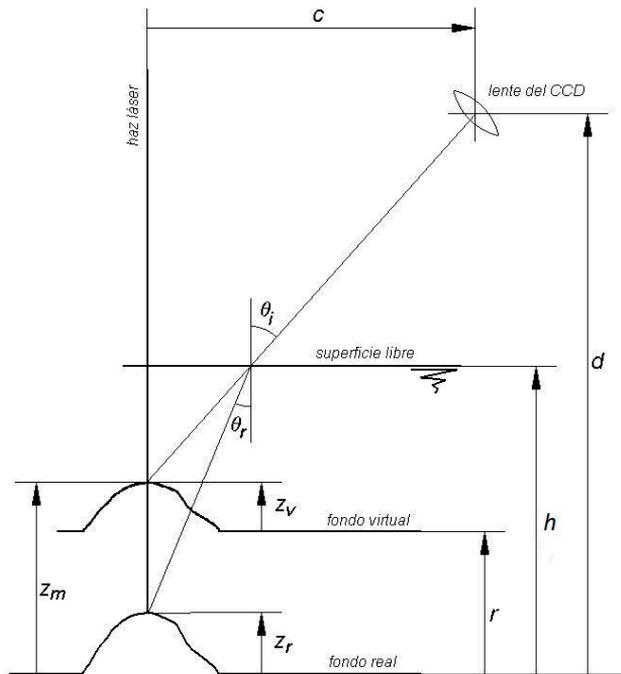


Figura 3.26. Transformación introducida por la refracción en las medidas del patrón.

Las ecuaciones representativas son ahora:

$$(d - h) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) + (h - z_r) \cdot \operatorname{tg}(\theta_r) = c \quad [33]$$

$$(d - z_m) \cdot \operatorname{tg}(\theta_i) = c \quad [34]$$

$$z_v = z_m - r \quad [35]$$

donde z_r es la altura real, z_m la altura medida con el escáner, 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. Aunque en la figura no se distingue

fácilmente, los resultados correspondientes a los distintos calados hasta 400 milímetros aparecen superpuestos en los puntos representados en la gráfica.

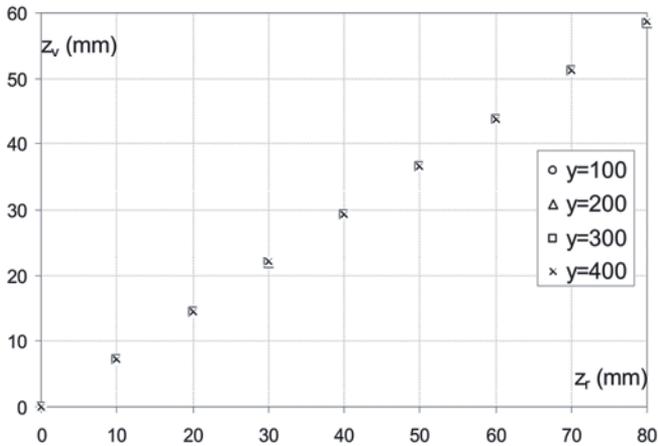


Figura 3.27. Relación teórica entre altura real y altura virtual, para distintos calados

Al igual que en los ensayos con fondo plano, el análisis se centró en el registro de la línea media. Realizando el promedio de las mediciones realizadas con cuatro barridos, y representando dichas mediciones con respecto a tres de los calados analizados, incluyendo la comparación con la situación existente sin refracción, obtenemos la siguiente figura.

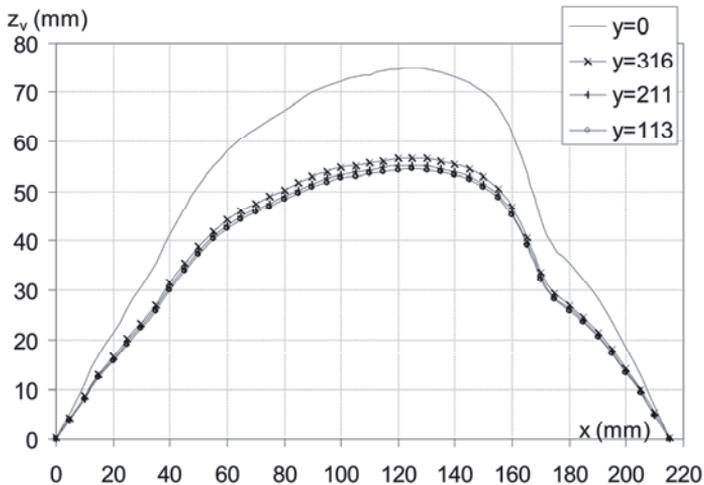


Figura 3.28. Perfiles del objeto patrón con diferentes calados

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

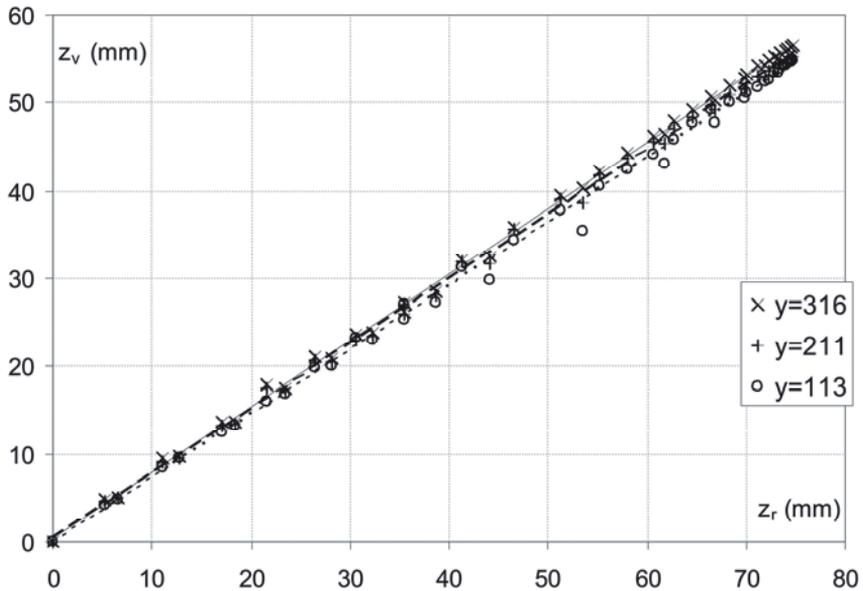


Figura 3.29. Relación experimental entre altura real y altura virtual

La gráfica anterior muestra resultados coincidentes con la relación teórica obtenida en la figura 10. 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.

Con el menor calado, se produce una inestabilidad de dicha lámina por la presencia del objeto, cuyo efecto puede notarse en la siguiente gráfica en el intervalo de alturas reales entre 40 y 55 milímetros, analizando las desviaciones de las alturas virtuales correspondientes a cada calado respecto de su recta de regresión, mostradas en la figura 3.30.

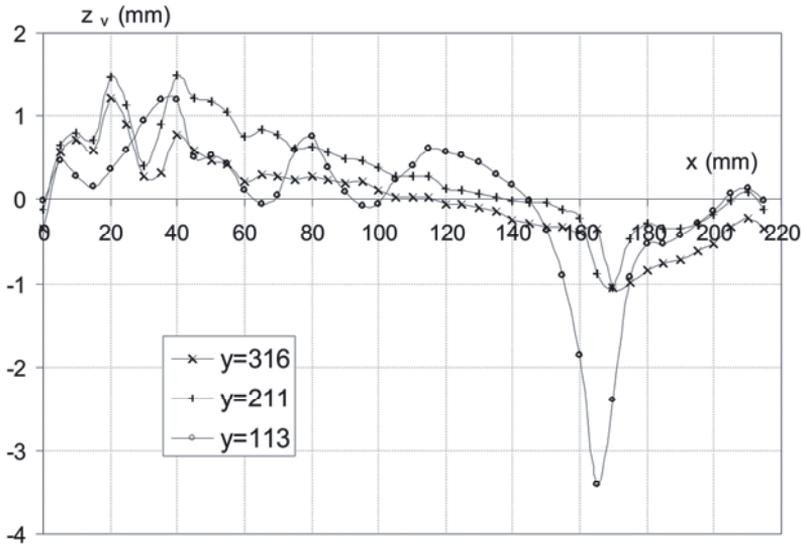


Figura 3.30. Desviaciones de las medidas del perfil del objeto respecto de las rectas de regresión con distintos calados.

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.

3.3.4. Restitución de la refracción: obtención de perfiles sumergidos.

Los resultados anteriores reflejan la adecuación del escáner para reproducir el estudio teórico desarrollado. De esta forma se han obtenido dos relaciones lineales entre las variables fundamentales de ambas series de ensayos (figuras 7 y 12).

$$r = C_1 \cdot y \quad [36]$$

$$z_v = C_2(y) \cdot z_r \quad [37]$$

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 12, 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 hidráulico posterior en régimen no permanente, el escáner 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.

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_v = \frac{1}{C_2} (z_m - r) = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} h \quad [38]$$

Estas conclusiones hacen referencia obligatoriamente a las condiciones existentes en la experimentación realizada. El presente estudio demuestra así la aplicación que el escáner tiene en el estudio de la restitución de superficies de objetos bajo una lámina de agua, 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.

3.4. Superficies en tres dimensiones. Restitución de la refracción.

3.4.1. Desarrollo teórico del problema de la refracción en tres dimensiones.

La adquisición de una imagen por parte del Polhemus 3D está basada en los ángulos bajo los que las cámaras observan el haz láser proyecta, tal y como se vio en la introducción teórica al problema en dos dimensiones de la línea media.

Los ángulos γ y β son medidos en el CCD de la cámara, α y c son constantes geométricas del equipo, y con ellos se determina las coordenadas (y,z) del equipo, con las expresiones

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \quad [39]$$

$$z = \frac{c}{\tan \theta} \quad [40]$$

$$y = z \cdot \tan \gamma \quad [41]$$

Esto puede verse representado en el espacio en la siguiente figura para el caso de un fondo plano.

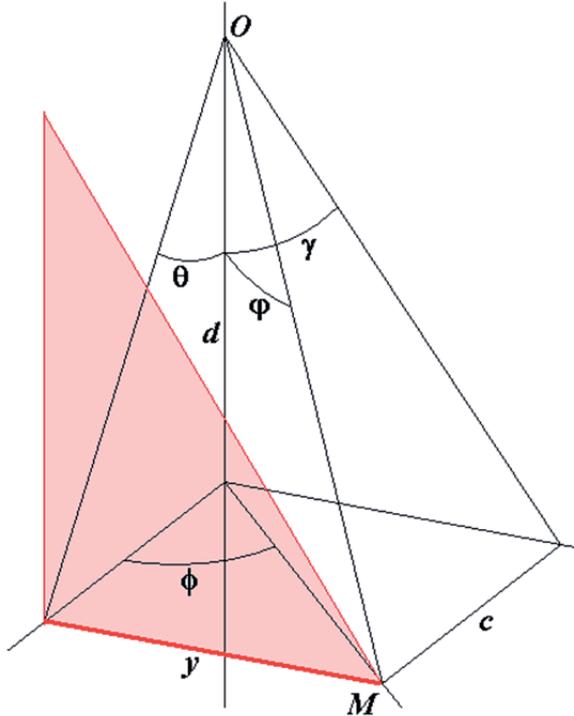


Figura 3.31. Triangulación activa en 3D. Vista espacial.

En ella se ha introducido el ángulo φ que forma el haz OM bajo el cual la cámara observa el punto (y,z) y que será el que se desvíe por refracción de acuerdo con la ley de Snell.

Para un fondo plano a una distancia vertical d del centro óptico de la lente, la relación entre el ángulo φ y la coordenada y del punto observado es la expresión trigonométrica.

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\sqrt{c^2 + y^2}}{d}\right) \quad [42]$$

Bajo una lámina de agua el haz OM se desvía de acuerdo con la ley de Snell, teniendo ahora la situación que puede verse en la siguiente figura

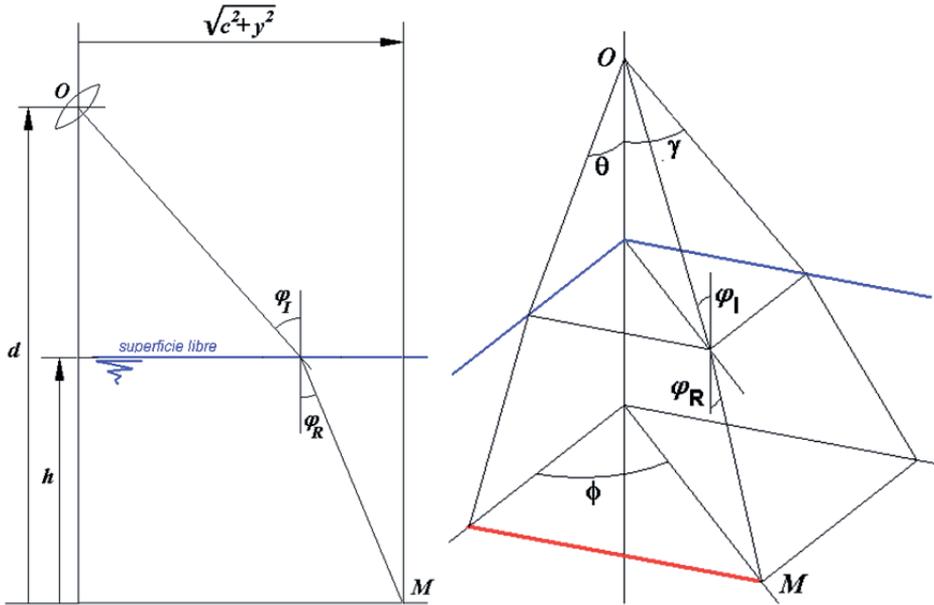


Figura 3.32. Transformación introducida por la refracción en 3D.

Con lo que el ángulo que “ve” el Polhemus FastScan, es ahora φ_i , el ángulo incidente antes de sufrir la refracción al cambiar de medio. La ecuación para la refracción en el plano donde ésta se produce es ahora, para una altura de lámina de agua h

$$(d - h) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + h \cdot \operatorname{tg}(\varphi_r) = \sqrt{c^2 + y^2} \quad [43]$$

Los ángulos incidente y refractado se relacionan de acuerdo con la ley de Snell, para el aire y agua

$$\operatorname{sen}(\varphi_i) = \frac{n_r}{n_i} \cdot \operatorname{sen}(\varphi_r) = 1.333 \cdot \operatorname{sen}(\varphi_r) \quad [44]$$

Al igual que se hizo en el apartado 3.3.1, introduciendo este resultado en la ecuación [43] se obtiene la ecuación no lineal

$$(d - h) \cdot \operatorname{tg}(\varphi_i) + h \cdot \operatorname{tg}\left(\operatorname{arcsen}\left(\frac{\operatorname{sen}(\varphi_i)}{1.333}\right)\right) = \sqrt{c^2 + y^2} \quad [45]$$

La ecuación anterior debe resolverse numéricamente y para cada valor de h e y se tendrá un ángulo ϕ_i .

Los ángulos θ y γ medidos en la imagen –virtual, la que “ve” el escáner-, servirán para obtener las coordenadas (y_v, z_v) de los puntos del fondo medidos por el Polhemus. Se pueden relacionar en este estudio teórico con los ángulos restantes mediante las expresiones, extraídas de la figura 3.32.

$$\tan \phi = \frac{y}{c} \quad [46]$$

$$\tan \theta = \tan \phi_1 \cdot \cos \phi \quad [47]$$

$$\tan \gamma = \tan \phi_1 \cdot \text{sen} \phi \quad [48]$$

La secuencia de transformación de la superficie real (y, z) en la virtual (y_v, z_v) observada por el escáner 3D, se resume matemáticamente del siguiente modo para cada calado h .

- Con los valores de h e y se obtiene de ϕ_1 resolviendo la ecuación [45]
- Obtenido ϕ_1 tenemos el valor de θ y γ por medio de las ecuaciones [46] a [48]
- Con θ y γ se obtienen (y_v, z_v) mediante las expresiones [40] y [41].

Separando el problema por coordenadas tenemos

$$y_v = z_v \cdot \tan \phi_1 \cdot \text{sen} \phi = \frac{c}{\tan \phi_1 \cdot \cos \phi} \cdot \tan \phi_1 \cdot \text{sen} \phi = c \cdot \tan \phi = y \quad [49]$$

Este desarrollo para la coordenada y concluye que no hay variación en la misma teniendo finalmente $y_v = y$, por lo que el estudio se centrará en la variación en la altura z .

$$z_v = \frac{c}{\tan \phi_1 \cdot \cos \phi} = \frac{c}{\tan \phi_1} \cdot \sqrt{1 + \frac{y^2}{c^2}} \quad [50]$$

Para obtener la coordenada z es necesario por tanto resolver la ecuación implícita [45] e introducir el valor de ϕ_1 en [50]. La ecuación [50] en apariencia es una hipérbola, pero al ser el valor de ϕ_1 dependiente de la coordenada y , se trata de una función más compleja.

Una de las conclusiones más importantes, que se verificará en el estudio de calibración y hará que sea más sencilla la transformación inversa para deshacer la refracción es el hecho de que la coordenada y y de los puntos no varíe. Junto con la x , que no varía si se hace entrar el haz láser de manera perpendicular a la superficie del agua, en conjunto se tendrá que la proyección en planta de los puntos no varía, haciéndolo únicamente su elevación. Esto simplificará en gran manera la transformación inversa.

Si tomamos como valores $z=0$, $y=[-100,100]$ (coordenadas del fondo plano del canal), $c=250$ y $d=790$ (estas últimas constantes geométricas que dan la posición del centro óptico de la lente tal y como se vió en el apartado 3.3.1) para cuatro distintos calados $h=0, 100, 200, 300$, el resultado del cálculo teórico puede verse en la siguiente figura.

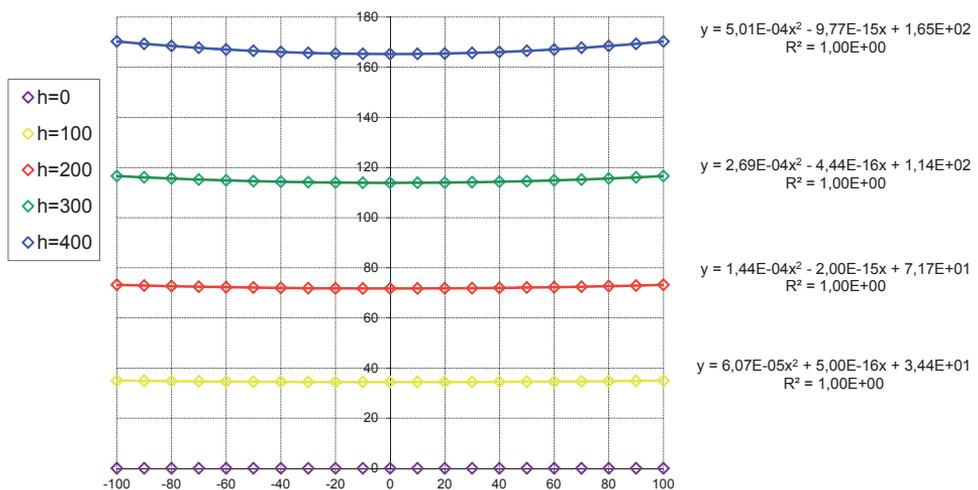


Figura 3.33. Elevación teórica de los perfiles en 3D (milímetros).

La imagen teórica del fondo bajo una lámina de agua se eleva y se curva hacia arriba en sus bordes.

Para simplificar el análisis posterior se ha realizado sobre las curvas teóricas un ajuste de regresión a una función cuadrática dando como resultado una parábola simétrica con la correlación muy elevada que puede verse también en el gráfico.

3.4.2. Elevación y curvado de un fondo plano.

Al igual que se hizo para el plano medio en apartado 3.3., se ha comparado los resultados anteriores con los obtenidos experimentalmente midiendo el fondo plano del canal bajo una lámina de agua observándose el mismo comportamiento. Se ha realizado por dos veces una batería de mediciones del fondo con diferentes calados o alturas de de lámina de agua y, en todos los casos plana y horizontal, es decir, la condición más favorable para restituir la trasformación que introduce la refracción. Los resultados correspondientes se muestran ahora en forma de imágenes obtenidas del fondo.

En primer lugar se muestra una imagen del fondo sin lámina de agua.

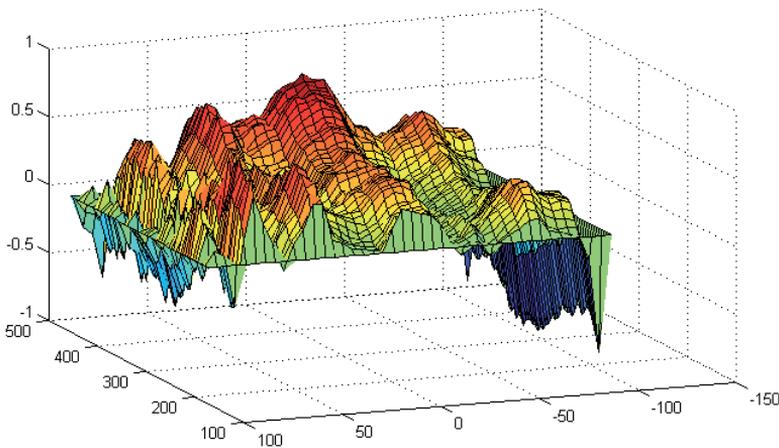


Figura 3.35. Fondo plano medido por el escáner sin agua (milímetros).

Si se observa la escala distorsionada del eje z de la figura, puede verse que el ruido está dentro de la precisión de medida, en torno a 0,5 mm. A la derecha puede verse un borde afilado, anomalía que puede deberse al hecho de que el fondo del canal es de acero sin cubrir, y las superficies metálicas deben ser en principio evitadas.

Las imágenes que se muestran a continuación corresponden a los siguientes calados de agua

h (mm)	71	143	196	250	297	355
----------	----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabla 3.3. Calados de agua para los experimentos de fondo plano.

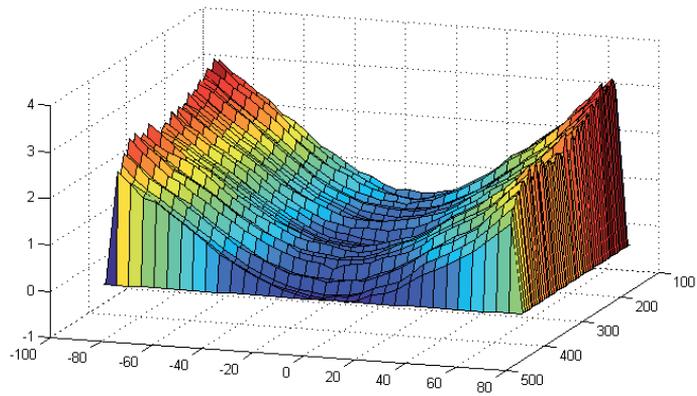


Figura 3.36. Fondo plano medido con un calado $h=71$ mm

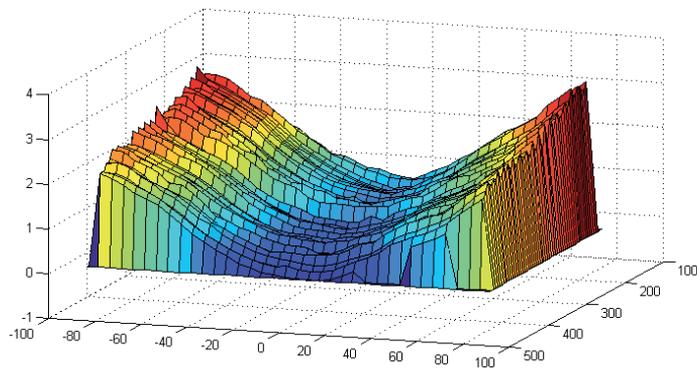


Figura 3.37. Fondo plano medido con un calado $h=143$ mm

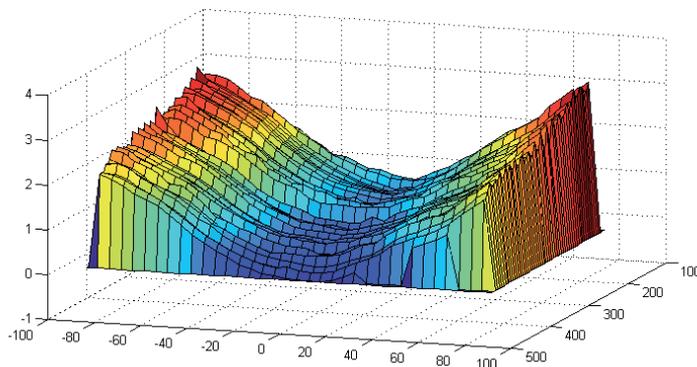


Figura 3.38. Fondo plano medido con un calado $h = 196$ mm

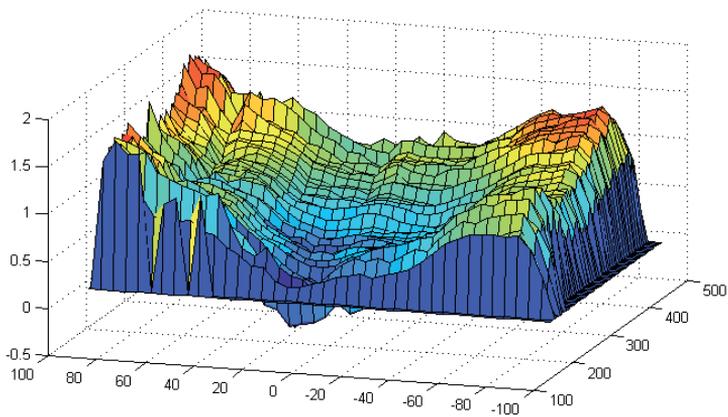


Figura 3.39. Fondo plano medido con un calado $h = 250$ mm

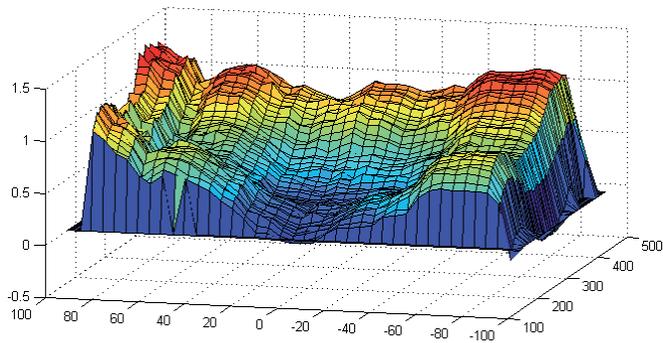


Figura 3.40. Fondo plano medido con un calado $h = 297$ mm

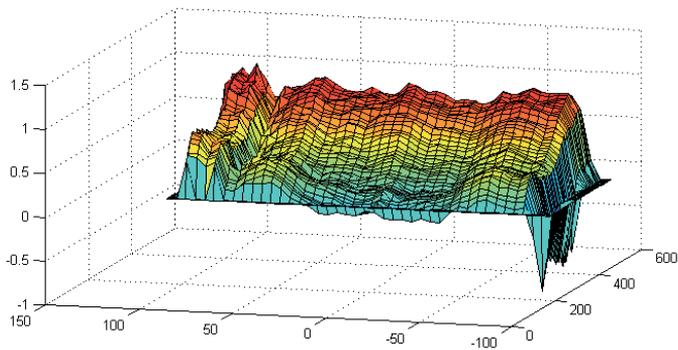


Figura 3.41. Fondo plano medido con un calado $h = 355$ mm

De la forma de esta serie de figuras pueden sacarse las siguientes conclusiones:

- La refracción xz del haz láser hace que la superficie virtual observada por el equipo se curve hacia arriba en ese plano según lo esperado.
- La curvatura es mayor cuanto menor es el calado o altura de lámina de agua.
- Mayores calados corresponden a mayores caudales en el canal, aumentando también la inestabilidad en la lámina de agua, que se manifiesta en forma de ruido en las últimas imágenes.
- La variación según el eje x se mantiene dentro de la resolución del equipo.

Tomando el promedio de valores para todo el desplazamiento en z podemos ver la curvatura y elevación en el plano (y,z). Para los diferentes calados experimentales se puede observar la misma forma aproximadamente parabólica obtenida en el estudio teórico.

Esta tendencia coincide con la observación directa y con los datos experimentales, que aparecen en el siguiente gráfico.

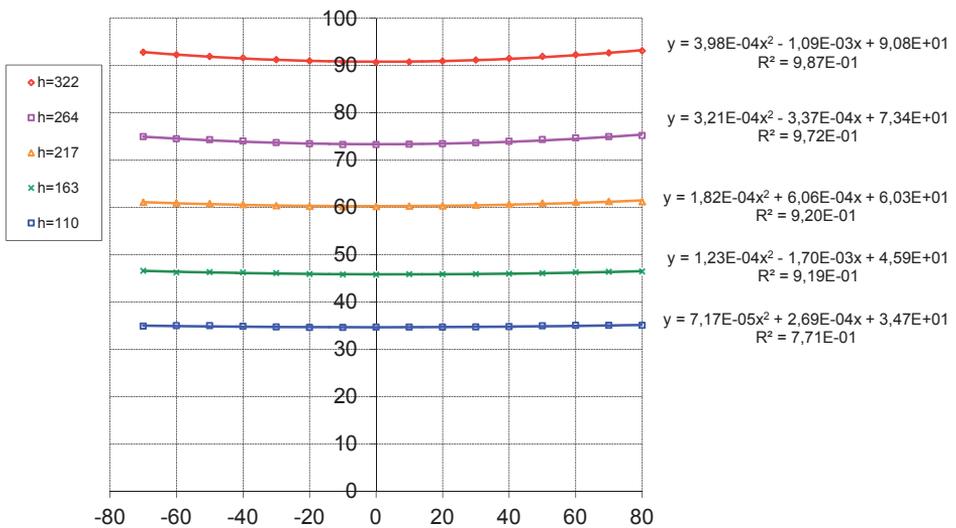


Figura 3.42. Elevación promedio del medida experimentalmente en 3D (milímetros).

En este segundo gráfico puede observarse que la correlación es más baja para los valores con menor altura de lámina de agua. Esto es así porque los errores de lectura del instrumento son del orden de magnitud de la elevación hacia arriba de la imagen en sus bordes, confirmando la necesidad de mejorar las condiciones de los ensayos.

Si analizamos las curvas teóricas para ver la tendencia, podemos ver que se aproxima mucho ($R^2=0.999994$) a una parábola simétrica en la forma $z = a_2y^2 + a_0$, de la que se separa en el rango de la curva por debajo del 0,004%. Se tratará ahora de estudiar la tendencia de los coeficientes a_0 y a_2 en función de la altura de lámina h . El primero corresponderá al estudio ya hecho de la refracción en el plano medio ($y=0$).

El estudio de sensibilidad de estos dos parámetros puede verse en el siguiente gráfico (a_0 en rojo, $a_2*100000$ en azul)

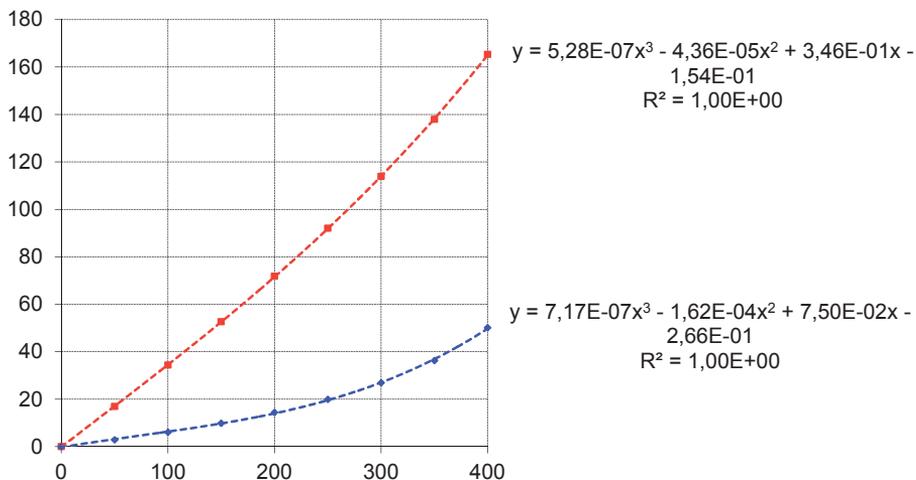


Figura 3.43. Ajuste parabólico de los perfiles teóricos.

Si hacemos la misma comparación para los resultados experimentales tenemos un gráfico similar (a_0 en rojo, $a_2*100000$ en azul)

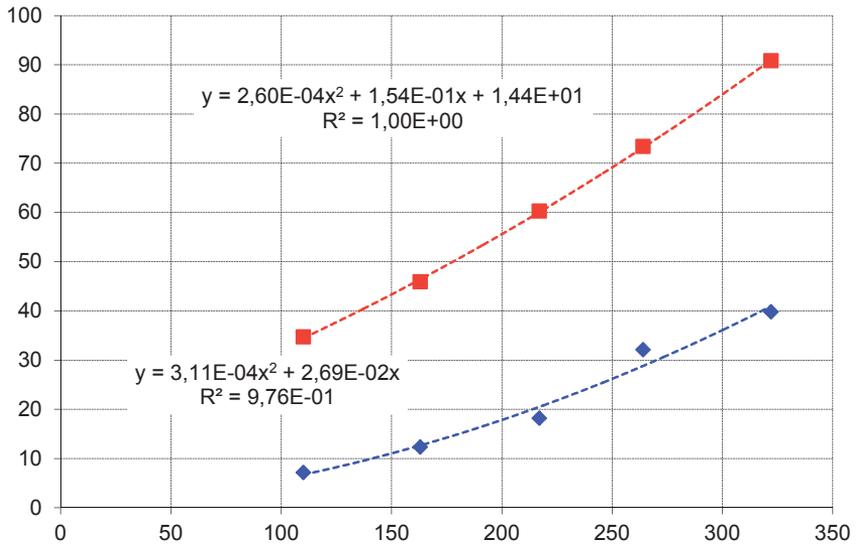


Figura 3.44. Ajuste parabólico de los perfiles obtenidos experimentalmente.

3.4.3. Identificación de puntos individuales en un patrón.

El estudio anterior anterior permite comprobar con datos experimentales que las curvas que representan el perfil transversal del fondo tienen la forma parabólica prevista por el estudio teórico. Éste predice que las coordenadas x e y no varían con la transformación; en ese caso sólo sería necesario transformar la coordenada z según la ecuación parabólica vista. Cualquier otro punto de una superficie sufrirá la misma transformación, elevándose tanto más cuanto más se aleja del plano de simetría.

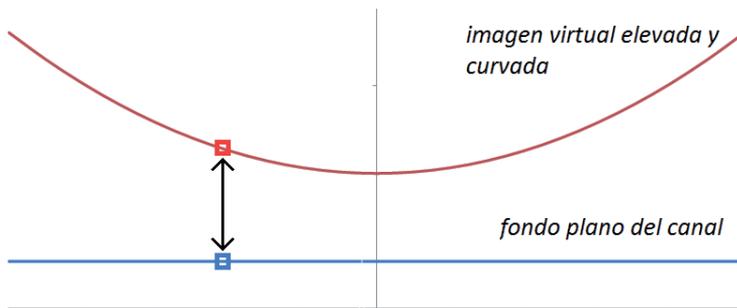


Figura 3.45. Correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie virtual deformada y los valores reales.

Sin embargo la medida de un fondo plano no permite determinar la posición virtual de puntos individuales para hallar la correspondencia biunívoca con sus coordenadas reales y deshacer la transformación que introduce la refracción tal y como se hizo en el apartado 3.3.4. para el plano central.

Para comprobar experimentalmente estas asunciones de la transformación teórica ha sido necesario diseñar un procedimiento de calibración más preciso, que se describe a continuación en este apartado y el siguiente. El primer paso es el desarrollo de un algoritmo para extraer posiciones concretas de un patrón de calibración y el segundo medir el mismo patrón bajo el agua para identificar puntos individuales en la superficie deformada por la refracción.

Este procedimiento está basado en la medida de un patrón de calibración consistente en una placa plana con pirámides que puede verse en la figura 3.45. Los vértices de las mismas forman de nuevo un plano, pero esta vez con puntos fácilmente localizables en una imagen. Se tratará de obtener sus coordenadas para tener la imagen virtual deformada de una malla de puntos.

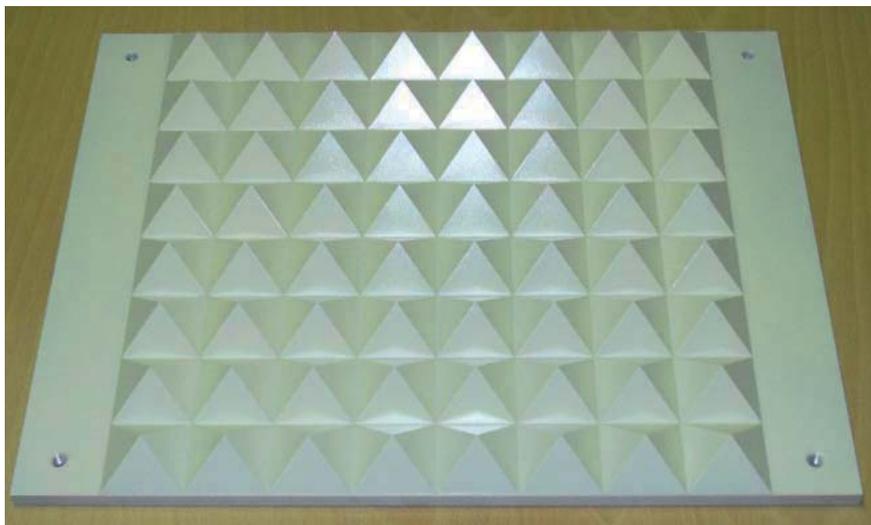


Figura 3.46. Patrón de calibración para la identificación de puntos coincidentes.

El patrón se ha mecanizado en aluminio con precisión centesimal y se ha pintado con aerógrafo de color blanco mate de forma que no refleje el haz láser. Recordamos que el escáner Polhemus FastScan no es capaz de ver superficies metálicas, transparentes ni de colores oscuros. Para el desarrollo del algoritmo se

ha medido inicialmente el patrón en seco, sin una lámina de agua por encima. Las imágenes obtenidas tienen el aspecto que puede verse en la figura.

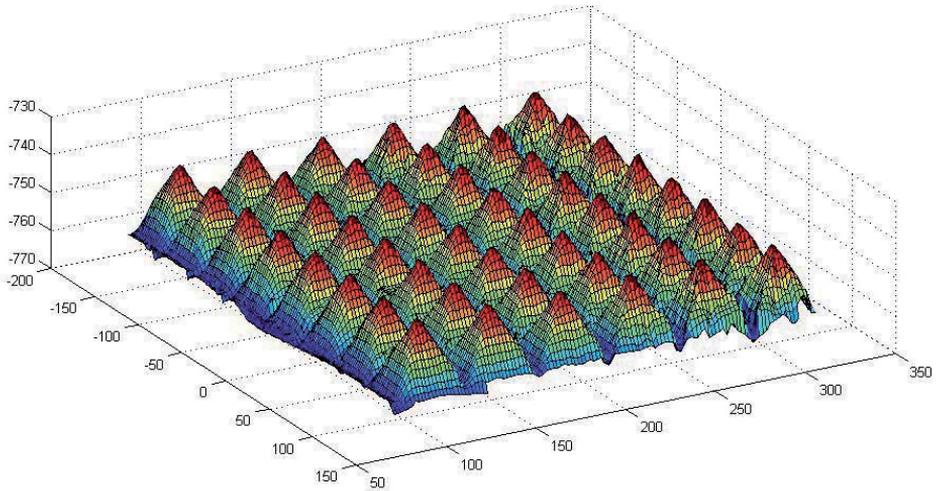


Figura 3.47. Imagen obtenida por el escáner 3D del patrón de calibración.

En el diseño y mecanizado de la placa se ha dado prioridad al acabado en los vértices y no en los valles, que no son bien resueltos por el escáner cuando la pistola se dispone cerca del patrón. Ello se debe al ángulo bajo el que las cámaras ven los flancos de las pirámides, pero no se ha dado importancia a este hecho al pretenderse reconocer los vértices y no los valles.

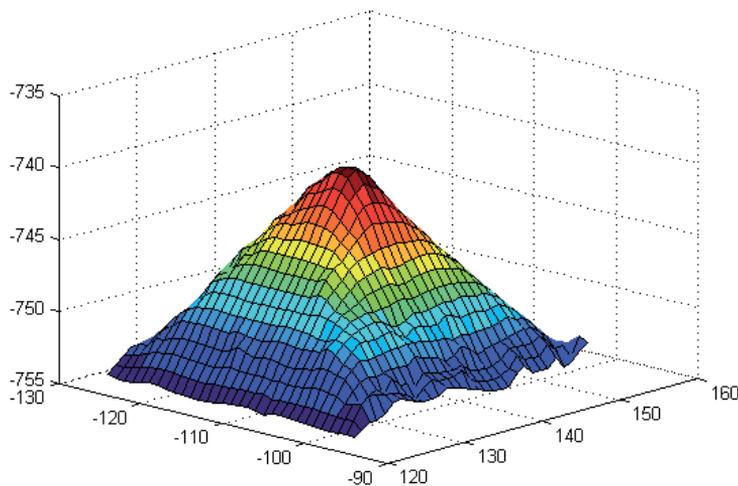


Figura 3.48. Pirámide individual extraída de la imagen completa.

Tal y como puede observarse en la imagen 3.48, el escáner es capaz de resolver bien los flancos pero no así el vértice en si mismo, por lo que para obtener su vértice, la estrategia de obtener el punto de máxima cota no es válida.

En lugar de esto se tratará de ajustar los datos a la pirámide teórica –una superficie sintética- que más se aproxima a ellos. Para ello se realizará un ajuste por correlación cruzada.

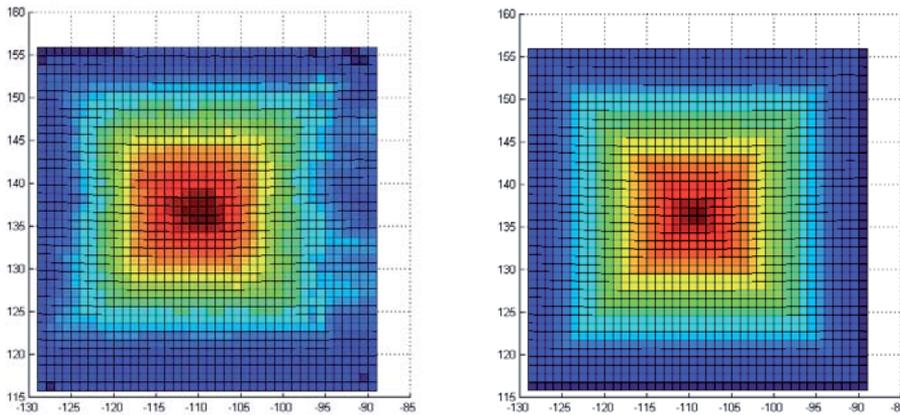


Figura 3.49. Pirámide medida y pirámide generada sintéticamente.

El ajuste se hará en dos pasos: primero una correlación bidimensional para obtener las coordenadas en planta del vértice, y luego una en vertical para obtener su elevación.

Para la primera el vértice de la pirámide para el ajuste z_{fit} se desplazará en el entorno del máximo local determinando en cada desplazamiento la correlación entre las dos imágenes realizando una correlación cruzada discreta del modo

$$C(d_x, d_y) = \sum_{i,j} z_{data}(x_{i,j}, y_{i,j}) \cdot z_{fit}(x_{i,j} + d_x, y_{i,j} + d_y) \quad [51]$$

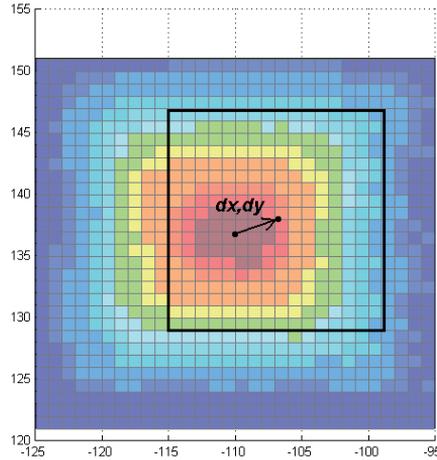


Figura 3.50. Correlación para la determinación del vértice.

La posición del máximo de la integral de convolución C determinará la pirámide que más se ajusta a los datos.

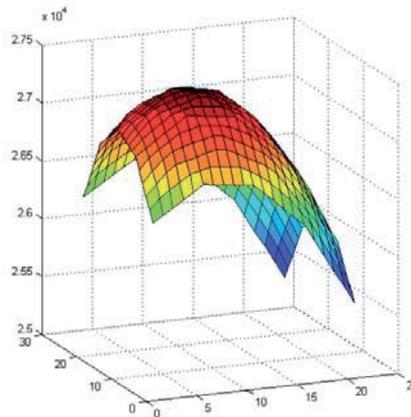


Figura 3.51. Parábola de valores de correlación.

Los valores $C(d_x, d_y)$ generados de este modo tienen la forma parabólica que se ve en la imagen 3.50. Este hecho puede emplearse para obtener únicamente el valor de convolución en 5 puntos en forma de cruz separados una distancia d alrededor del máximo local del modo que puede verse en la figura, para realizar a continuación un ajuste a la parábola por 3 puntos en los dos ejes, con un significativo ahorro en coste de cálculo.

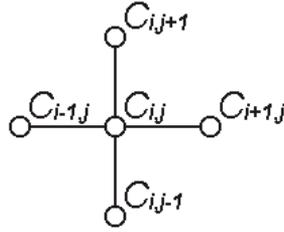


Figura 3.52. Puntos elegidos para el ajuste cuadrático.

$$x_0 = x_{maxlocal} + \frac{C_{i-1,j} - C_{i+1,j}}{2C_{i-1,j} - 4C_{i,j} + 2C_{i+1,j}} \cdot d \quad [52]$$

$$y_0 = y_{maxlocal} + \frac{C_{i,j-1} - C_{i,j+1}}{2C_{i,j-1} - 4C_{i,j} + 2C_{i,j+1}} \cdot d \quad [53]$$

Una vez obtenida la posición del vértice en planta se tratará de hallar su elevación generando tres pirámides separadas entre sí una altura h , medir la distancia de cada una de ellas a la pirámide real en el sentido del error cuadrático medio (ECM) y de nuevo hacer una interpolación parabólica para determinar el mínimo.

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i,j} (z_{data} - z_{fit} + z_{offset})^2 \quad [54]$$

para tener ahora

$$z_0 = z_{maxlocal} + h \cdot \left(1 + \frac{ECM_0 - ECM_{2h}}{2ECM_0 - 4ECM_h + 2ECM_{2h}} \right) \quad [55]$$

Si representamos ahora la diferencia entre la pirámide medida y la pirámide sintética que representa el mejor ajuste, podemos ver que la imagen tomada por el escáner redondea las aristas y el vértice, que es donde más se separa de la pirámide ideal, confirmando la idea de no escoger el máximo local como vértice de la misma.

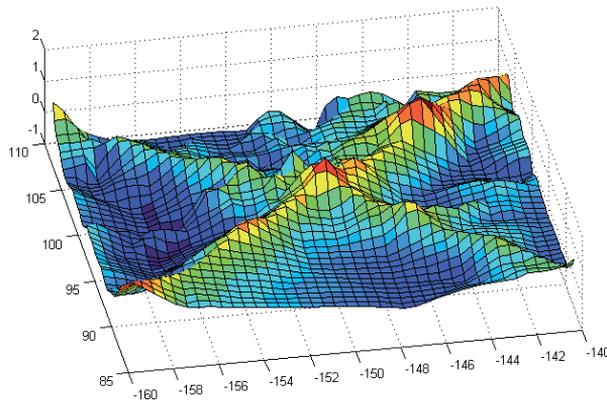


Figura 3.53. Diferencia en milímetros entre los datos medidos y la pirámide que mejor se ajusta a ellos.

El resultado para la posición en planta de los vértices medidos sin una lámina de agua sobre ellos puede verse en la figura 3.53., apreciándose un claro escalado de la coordenada x (dirección de desplazamiento de la pistola), que hace que los puntos se separen progresivamente de su posición real en una malla con un equiespaciado de 40 mm.

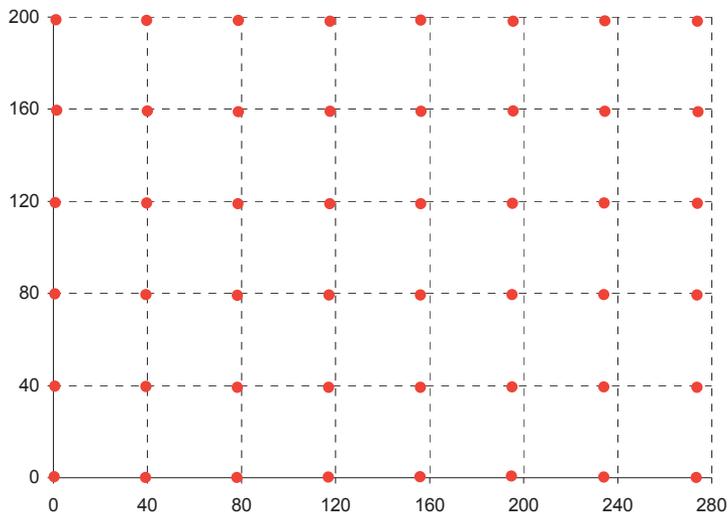


Figura 3.54. Posiciones de los vértices obtenidas en la calibración.

Este desvío se produce en una dirección que nada tiene que ver con el desarrollo teórico y restitución de la refracción, sino con el avance de la pistola al hacer el

barrido, y por tanto con el sistema de posicionamiento por campos electromagnéticos. El desvío es proporcional linealmente con la distancia y puede por tanto ser corregido.

Esta deriva tiene que ver con causas que dependen del sistema comercial empleado y no del principio físico básico de la refracción, y que podrán ser corregidas en post-proceso o bien eliminadas con el uso de otro equipo. Una manera sencilla de corregirlo, muy utilizada en equipos de video digital es colocando, lejos de la zona de interés, objetos identificables en la superficie obtenida a modo de patrones.

3.4.4. Calibración bajo una lámina de agua.

Una vez desarrollado el algoritmo para obtener el vértice de las pirámides en la imagen para buscar puntos coincidentes, se tomará una medida de la misma bajo una lámina de agua. Como primera aproximación al problema 3D, se han tomado con el agua estancada, y por tanto una superficie libre plana, horizontal, y normal a la dirección de entrada del haz láser. El montaje en el canal del CITEEC puede observarse en la figuras 3.54. En ella es evidente el efecto de la refracción.



Figura 3.55. Patrón de calibración bajo una lámina de agua.

Se tomaron imágenes para diferentes calados de agua y el resultado tiene el aspecto de la siguiente figura. En ella puede observarse los siguientes elementos:

- El fondo plano del canal
- El lateral plano del patrón de calibración
- 4 líneas de 6 pirámides.

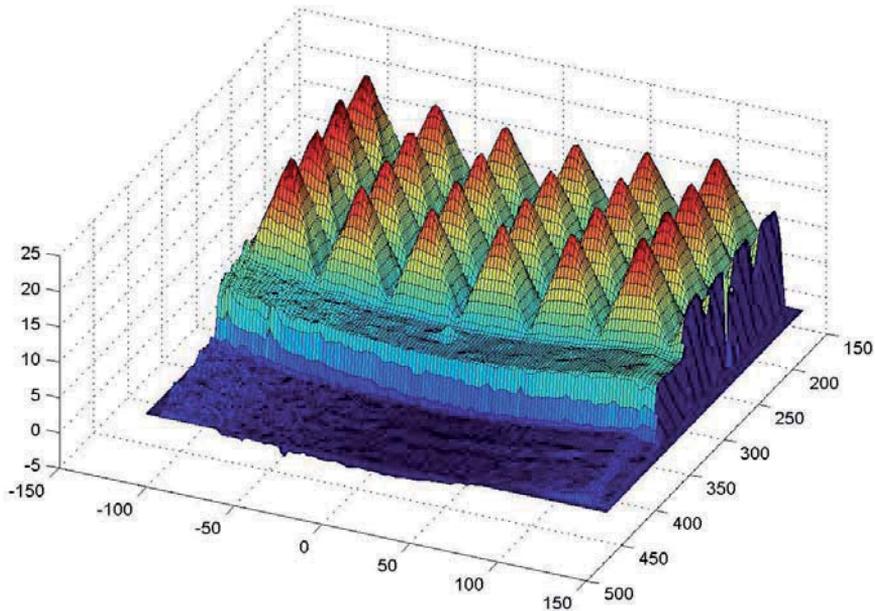


Figura 3.56. Imagen del patrón obtenida bajo una lámina de agua.

En todos ellos es apreciable la curvatura de los lados de la imagen hacia arriba, debida a la refracción en el plano YZ. El algoritmo descrito en el punto anterior obtiene las coordenadas de los vértices para estudiar tal y como se pretendía la elevación virtual de los puntos de la malla de calibración.

Empleando el procedimiento desarrollado en el punto anterior se han extraído las posiciones de los vértices en el plano xy y éstas coinciden con los resultados obtenidos sin agua y vistos en la figura 3.54. Esta coincidencia confirma el resultado teórico de que los puntos de la superficie real únicamente sufren una elevación en su imagen virtual debido a la refracción mientras que la coordenada y no varía. Las ecuaciones de transformación de coordenadas estén desacopladas y este hecho simplifica la tarea de restituir la superficie real del fondo.

3.4.5. Restitución de la refracción.

Las conclusiones del nuevo estudio con el patrón de calibración permiten extender la relación [56] obtenida para la línea central en 3.3.4. y obtener las relaciones de transformación de coordenadas fuera de ella y en las tres dimensiones.

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_v = \frac{1}{C_2} (z_m - r) = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} h \quad [56]$$

En donde z_r y z_v son las coordenadas medidas (virtual) y corregidas (real) de la superficie obtenida por el escáner y h es el calado.

Una vez demostrado tanto en los estudios teóricos y experimentales que la restitución de la refracción debe hacerse únicamente respecto de la coordenada z , la ecuación [56] para el perfil longitudinal en 2D puede extenderse fuera del plano central de simetría con un término cuadrático que representa la curvatura virtual hacia arriba tal como se vió en los apartados 3.4.1. y 3.4.2.

$$z = a_2 y^2 + a_0 \quad [57]$$

En donde la constante a_0 corresponde a la elevación de la línea media dada por la ecuación [56]. Combinándolas, la forma final de la ecuación de transformación que convertirá las alturas observadas en la imagen distorsionada –alturas virtuales z_v - y las alturas que se desean obtener de la superficie del fondo –alturas reales z_r -, tendrá la forma siguiente

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} h - C_3 \cdot y^2 \quad [58]$$

Los parámetros C_1 a C_3 deberán ser obtenidos antes de comenzar el experimento con un ensayo de calibración. Dado lo relativamente costoso del mismo en términos del tiempo empleado, se tratará de no modificar las condiciones de ensayo salvo que esto sea imprescindible para una nueva batería.

La conclusión final de este apartado es que ha quedado demostrada la posibilidad de corregir la transformación introducida por la refracción en las imágenes

tomadas por un escáner 3D a través de una lámina de agua fluyente, y que ésta responde a una ecuación sencilla con unos parámetros que pueden obtenerse a través de una calibración previa.

En el capítulo 4 se estudiará la precisión de tales medidas corregidas y en el 5 se verá una aplicación práctica de las mismas. Estos resultados han sido publicados en dos revistas indexadas tal y como aparece en el apéndice.

3.5. Perfiles en dos dimensiones. PIV en plano longitudinal

3.5.1. Introducción. Perfiles de fondo en una imagen PIV.

Tal y como se explicó en la presentación, durante la realización de una serie de ensayos para la medición de campos de velocidades resultó obvio que de las imágenes obtenidas por un PIV podía extraerse más información que únicamente el campo de velocidades.

Durante esos experimentos destinados a la validación de un modelo numérico de transporte de sedimentos, se trató de medir simultáneamente el campo de velocidades y el perfil de fondo, y hacer esto último con dos herramientas: el escáner 3D ya presentado en el epígrafe anterior y el PIV.

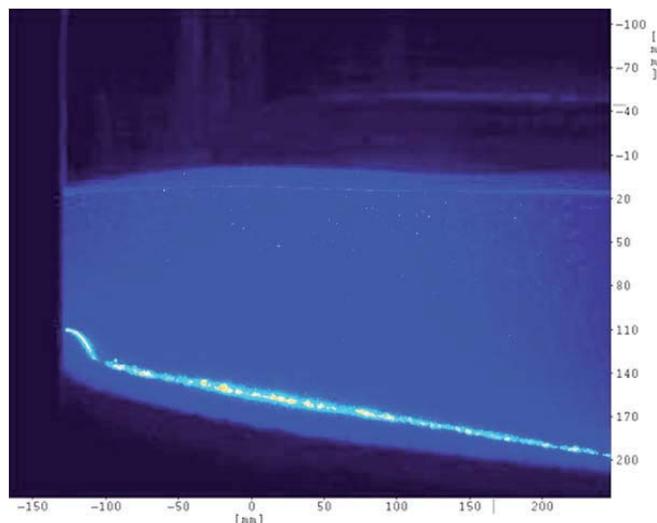


Figura 3.57. Imagen de un velocímetro de imagen de partículas con el plano láser iluminando la superficie libre y el fondo.

En concreto, y en la vista lateral de un canal de laboratorio a través de un cristal, eligiendo adecuadamente la distancia focal del objetivo y la posición de la cámara podía observarse nítidamente la intersección del plano láser con la superficie libre del agua y con la superficie de fondo.

Si bien el objetivo suministrado por el fabricante está en la gama denominada 'normal' en fotografía de 35 mm, cuando la imagen se forma en el CCD de la cámara, con dimensiones de 8,6 x 6,9 mm, el ángulo de visión es de 9,8°, que corresponde a un teleobjetivo. Para el estudio se empleó un objetivo de distancia focal 16mm cedido por LaVision para poder observar, gracias a su gran angular, la intersección del haz en la superficie libre del agua y en la superficie del sedimento, añadiendo esa información al campo de velocidades.

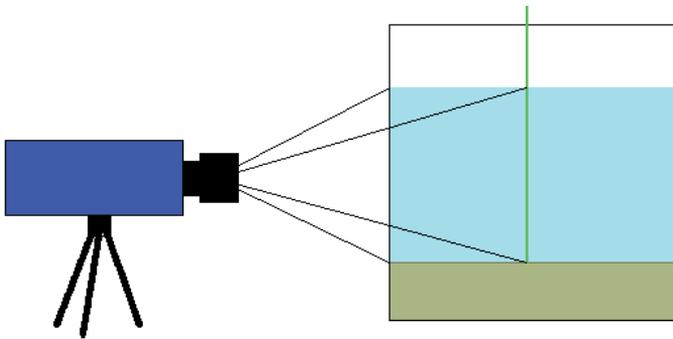


Figura 3.58. Posición lateral de la cámara con un objetivo gran angular.

De las imágenes del PIV pueden extraerse diferentes informaciones todas ellas muy importantes para los estudios de erosión y sedimentación como son los campos de velocidades y la tensión cortante, pero también se obtendrá un perfil de la línea media.

Esta información también sirvió calibrar y ajustar los datos obtenidos con el escáner. Además, y puesto que de la imagen tomada puede extraerse también la posición de la superficie libre, ésta puede utilizarse para la calibración necesaria para deshacer la transformación introducida por la refracción. La desviación de las medidas a lo largo del eje longitudinal de desplazamiento de Polhemus FastScan puede corregirse con los datos de la línea media de la superficie obtenida de este modo.

La identificación del perfil de fondo en una imagen PIV pasará por un procesado de datos automático en el que se localizará el mismo mediante la búsqueda del pico máximo de intensidad en la imagen, que corresponde al perfil iluminado por el láser, y la corrección de la distorsión que por diferentes motivos presenta la imagen. Los datos obtenidos para un perfil dentro de una campaña experimental real se compararán con los mismos obtenidos con el Polhemus FastScan.

3.5.2. Localización del máximo de luminancia

Tal y como se ha presentado, cuando se toman imágenes PIV de un canal con fondo erosionable, además de la posición de las partículas trazadoras, en la imagen puede observarse la intersección del haz láser con el fondo de arena, así como la intersección con la superficie libre. Además de un objetivo concreto de los experimentos citados, esta parte representa un objetivo transversal de la Tesis Doctoral: estudiar algoritmos de visión artificial capaces de extraer un perfil iluminado por el láser en una imagen digital.

Se trató entonces de programar una herramienta que obtuviese el perfil del fondo de manera automática. El algoritmo se desarrolló en el entorno Matlab, para lo cual fue necesario como primera tarea importar las imágenes desde el formato de archivo de DaVis, concretamente desde los archivos no comprimidos con extensión IMG.

Una vez importada en Matlab, la imagen de la figura 3.57 es una matriz de datos de intensidad de luz o luminancia en formato de número enteros de 12 bits con valores entre 0 y 4095. Con la disposición vista en la que la línea de fondo va de izquierda a derecha, se buscará en cada una de las columnas de la matriz el pico de luminancia que corresponderá al perfil buscado.

Si se estudia la estructura de datos por columnas puede verse lo siguiente (se han presentado las intensidades de imagen de varias columnas de píxeles)

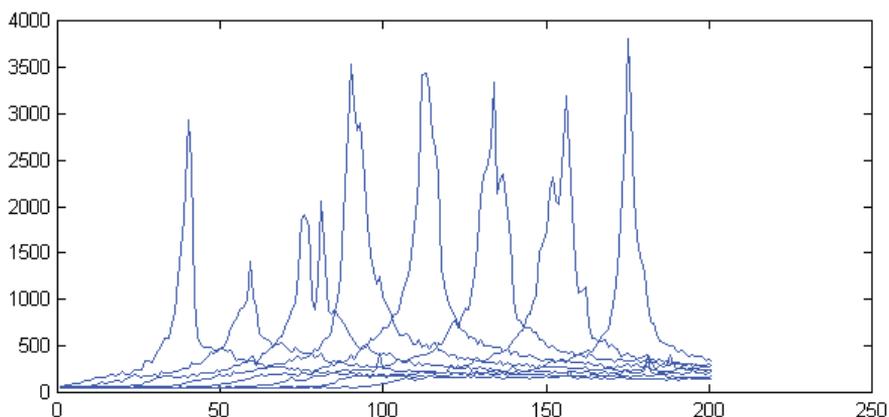


Figura 3.59. Valores de luminancia de columnas, los máximos correspondientes a la posición del perfil PIV.

En ella puede observarse que en algunos casos la posición del máximo de imagen es clara, y representa fielmente la posición del fondo, y en otros aparecen varios picos, originados por diferentes motivos, desde reflexiones difusas del láser en el árido del fondo hasta suciedad en el cristal a través del cual se toma la imagen.

La toma de estas imágenes además está condicionado por el uso del equipo PIV en tanto que la intensidad de iluminación se ajusta en función de las necesidades de éste para observar las partículas trazadoras, y en muchas ocasiones eso origina que la parte de imagen correspondiente a la línea esté saturada llegando al máximo de intensidad de luz en zonas relativamente amplias.

Es por ello que la estrategia de tomar el máximo de intensidad como medida del centro de la línea ‘pintada’ por el láser no se juzgó conveniente, y en lugar de ello se tomaron dos caminos alternativos para el desarrollo del algoritmo.

Por un lado se estudió la correlación de las intensidades con una campana de Gauss con una desviación típica que mantenga una forma similar a la curva de intensidades.

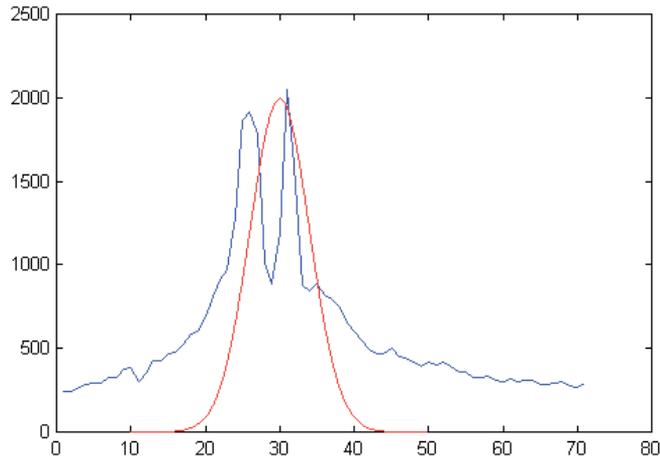


Figura 3.60. Correlación de los picos de intensidad con una campana de Gauss.

Desplazando la campana de Gauss en un entorno del máximo de intensidad y hallado los diferentes valores de convolución para cada desplazamiento, se encontrará el que supone un máximo de coincidencia, valor que sin duda representa mejor la línea de intersección del fondo, eliminando la distorsión por ruido que se introduce en la imagen.

Por otro lado se probó una estrategia alternativa tomando directamente el máximo de intensidad y realizando un suavizado sobre los datos con una media móvil centrada con diferentes números de datos.

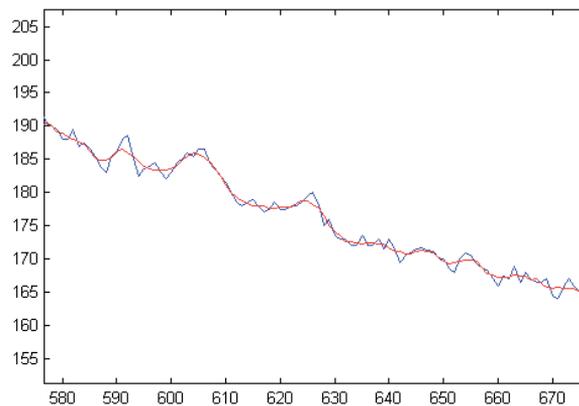


Figura 3.61. Perfil de máximos suavizado mediante una media móvil (milímetros).

Finalmente, tomando grupos centrados de 11 datos (5 hacia delante y 5 hacia atrás) se comprobó que los valores obtenidos, comparados con los de convolución, presentaban un error medio cuadrático (RMS) inferior a 0.5 milímetros -es decir, por debajo de un píxel- y aleatorio. Es por ello que se consideró esta segunda opción por requerir un coste de cálculo considerablemente inferior, del orden de 180 veces menos de acuerdo con el contador de operaciones en coma flotante de Matlab.

Del modo descrito, y para la imagen del ejemplo, puede obtenerse el siguiente perfil

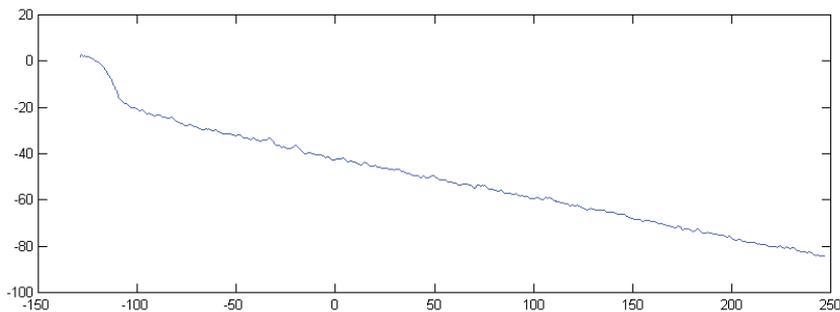


Figura 3.62. Perfil extraído por el programa de la imagen PIV (milímetros).

Sin embargo, para casos particulares de imágenes con una componente de ruido muy importante o saturación en la intensidad, se conservará la primera como alternativa. Este procedimiento será además la opción de elección cuando se pueda controlar la iluminación porque con un perfil de dispersión de luz más homogéneo es posible hacer una interpolación subpíxel tal y como se verá en el apartado final de este capítulo, que utilizará una técnica muy similar con otros medios.

3.5.3. Corrección de la distorsión. Funciones de orden superior.

Las imágenes tomadas a través de las lentes de cualquier cámara, y en particular de las de nuestro sistema PIV sufren una distorsión que puede separarse en dos partes fácilmente identificables y que ya se trataron en el Estado del Conocimiento: la distorsión de la perspectiva motivada por la observación de un plano con una lente cuyo eje no es perpendicular al mismo, y la debida a las imperfecciones de las propias lentes con forma de almohadilla u otras.

Éstas distorsiones deforman el plano observado con funciones de transformación entre las coordenadas reales y las del plano de imagen que serán en el mejor de los caso bilineales y en general de mayor orden. El empleo de un número mucho mayor de 4 marcas permite corregir distorsiones de perspectiva y cilíndricas, además de posibles distorsione de refracción. El empleo de más marcas de las necesarias permite tener información redundante y obtener las funciones que más se ajustan por mínimos cuadrados ofreciendo el programa además una medida de la calidad de este ajuste y por tanto de la calibración.

El software PIV toma una imagen con unas marcas con una forma predeterminada y que forman una malla cartesiana, localizándolas en la misma de nuevo con técnicas de correlación estadística en dos dimensiones. En función de la posición en la imagen de estas marcas, obtendrá una transformación en forma de polinomio de dos variables y de tercer grado.



Figura 3.63. Patrón de calibración del PIV.

Los archivos de imagen llevarán por tanto asociado un archivo de calibración para obtener las coordenadas reales de los puntos del perfil de fondo. Con las ópticas de calidad empleadas habitualmente en el estudio, puede observarse que los

coeficientes se corresponden con una transformación muy aproximadamente bilineal.

La secuencia en la que se realizan las operaciones tiene una influencia muy importante en el coste computacional del procesado de datos. Si se corrige la distorsión de la imagen y de la imagen corregida se extrae el perfil, el coste de cálculo es unas mil veces superior a invertir estas operaciones, extrayendo el perfil de la imagen sin corregir para luego utilizar las funciones anteriores y extraer las coordenadas físicas correspondientes.

Sin embargo, y puesto que es el software comercial del equipo PIV el que realiza los cálculos de mapeado, se ha estimado en este caso la primera opción es viable. Cuando se estudie al final de este capítulo un sistema completo abierto se insistirá en la obtención de esas funciones de transformación.

3.6. Obtención de medidas de perfiles con un equipo de bajo coste.

3.6.1. Equipos láser y cámaras de bajo coste.

Las técnicas descritas en el estado del arte para la digitalización de superficies en tres dimensiones están lejos de ser nuevas, pero durante los últimos años se han producido cambios significativos que han modificado sustancialmente la disponibilidad y usabilidad de las mismas. De todos ellos el más importante es la evolución de las cámaras digitales y la posibilidad de utilizar ajustes de sensibilidad ISO muy elevados en condiciones de escasa iluminación. El resultado es la posibilidad de utilizar fuentes de luz láser más baratas, con muchos modelos comerciales disponibles y, no menos importante, con menores requerimientos de seguridad.

La instrumentación de laboratorio empleada a lo largo de este estudio y otros parecidos ha sufrido varias evoluciones:

- De equipos comerciales adaptados a la digitalización de superficies a su uso en un laboratorio de hidráulica, a equipos láser genéricos y cámaras convencionales.
- De sistemas llave en mano cerrados que operan como cajas negras a equipos completamente abiertos en los que el tratamiento y la minería de datos han abierto muchas puertas que deben ser estudiadas.

Se ha pasado de utilizar un equipo científico no específico para la obtención de perfiles y superficies a un láser de nivelación de albañil y una cámara convencional. En ese proceso se ha pasado de resoluciones espaciales de 1,2 megapíxeles a 14 y de resoluciones temporales de 5 imágenes por segundo a 30. Existen como se ha visto muchos sistemas comerciales, pero no hay en absoluto ninguna necesidad de utilizar ningún láser o cámaras especiales tal y como se verá en este epígrafe.

Como parte final del desarrollo experimental de esta Tesis Doctoral, se verán las necesidades instrumentales y las técnicas y algoritmos de visión artificial para extraer la información relevante de las imágenes tomadas con estos equipos convencionales.

Los requerimientos de cualquier láser necesarios para estos estudios son sencillos: debe disponer de una óptica que lo transforme en un plano y debe tener suficiente potencia para poder ser observado por una cámara, pero tal y como hemos visto estos requerimientos han bajado sustancialmente con las nuevas sensibilidades ISO disponibles en las cámaras con valores en el entorno de milivatios. La comparación con el láser empleado por el PIV no es directa porque uno es continuo y mide su potencia en vatios y el otro es pulsado y la mide en julios, pero sí en la clase de seguridad.

Para la medida de perfiles en esta tesis doctoral se ha utilizado un láser comercial del tipo empleado por los albañiles para situar referencias horizontales o verticales para sus trabajos. El nivel de albañil empleado –modelo Z30859 de Powerfix Profi- es un láser de clase 2 con una potencia inferior a 1 mW y color rojo (635-650 nm). Funciona con pilas AA –el del PIV consume 3KW- y dispone de nivel de burbuja en dos ejes. Para futuros proyectos se ha adquirido asimismo otro modelo que proyecta dos planos ortogonales.

Proyecta un plano de un milímetro de espesor a partir de una lente cilíndrica con una apertura aproximada de 40°, aunque la apertura efectiva a efectos de medida es algo menor porque la calidad de la línea proyectada se resiente en los bordes.



Figura 3.64. Láser de nivelación de albañilería.

La escasa potencia del mismo requerirá bajar la luz ambiente para aumentar su visibilidad –el contraste dentro de la imagen- y tomar las fotografías o grabar los

vídeos con ajustes de sensibilidad ISO elevados (1600-3200), pero su clase de seguridad 2 evita por otro lado tener que emplear rigurosos protocolos de seguridad como sucede con el de clase 4 del equipo PIV del laboratorio.

A lo largo de los experimentos que se detallarán en el capítulo 5 de aplicaciones se han empleado varias Nikon DSLR (D5000, D90) con el objetivo kit Nikkor 18-55 DX VR para la toma de fotografías a 12 megapíxeles y la cámara compacta Sony NEX-3 con el objetivo kit 18-55 OSS para la grabación de video con resolución HD 1280x720. La ventaja de precio de las cámaras no específicas puede aplicarse del mismo modo a esas ópticas.



Figura 3.65. Cámaras de objetivos intercambiables utilizadas en el estudio.

Tal y como se detallará para algunos procedimientos la cámara ha estado firmemente sujeta a una estructura soporte y en otros las fotografías se tomaron a pulso. Para estas últimas y dada la escasa luz ambiente ha sido importante el uso de objetivos estabilizados para obtener imágenes nítidas.

3.6.2. Calibración con un patrón.

El procedimiento de calibración no difiere del visto en el caso de las imágenes PIV, basado en la toma de una imagen en la que se incluye un patrón con una matriz regular de formas conocidas. Pueden ser cruces, pueden ser círculos o cualquier otro tipo de dianas. En este caso en lugar de operar un software diseñado para hacer esto mismo se programarán los algoritmos necesarios.

Tal y como se vió en el punto 2.4., eligiendo una óptica sin distorsión la única deformación en la imagen es la introducida por la perspectiva que en este caso es bilineal, transformando los cuadrados en trapezoides.

La calibración precisa con una imagen patrón depende fundamentalmente de realizar bien dos tareas:

- Posicionar adecuadamente el plano de luz láser para que coincida con la medida que se desea tomar.
- Posicionar la plantilla con sus referencias en posiciones conocidas en coordenadas globales respecto del montaje experimental.

La imagen patrón puede estar incluida en todas y cada una de las imágenes de medida o bien tomarse una imagen al principio del experimento teniendo a continuación especial cuidado en no mover ni la cámara ni el láser.

Se presentarán ahora dos ejemplos, en el primero con el patrón incluido en todas las imágenes y en el que se obtendrá el perfil de la superficie por un procedimiento semicuantitativo, y el segundo con una calibración cuantitativa con un patrón de dianas en esta caso de video digital.

3.6.3. Corrección gráfica de la perspectiva. Medidas semicuantitativas. Perfiles transversales de un dique de escollera.

Cuando el patrón de calibración está incluido como referencia en todas las imágenes, la posición de la cámara respecto del láser tiene menos importancia, pudiendo de hecho tomarse las imágenes con la cámara sostenida a mano.

Este tipo de medidas se han realizado para obtener perfiles laterales de un dique de escollera sometido a la acción del oleaje en el laboratorio de Puertos y Costas del CITEEC que se detallará en el capítulo 5. En este caso no se ha trabajado bajo una lámina de agua sino que se ha vaciado cada vez el tanque para medir los perfiles. Ello es posible porque el tamaño de árido utilizado en el estudio –zahorra del orden de 3 cm- no se moviliza en las operaciones de llenado y vaciado.

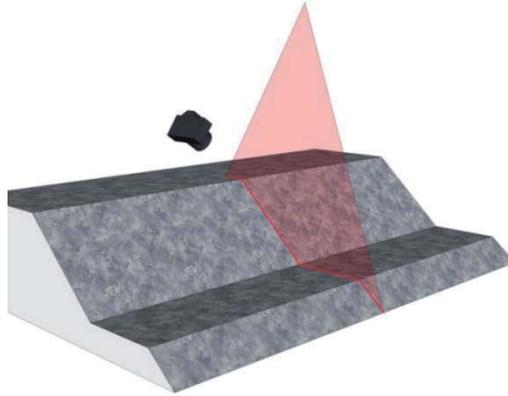


Figura 3.66. Posición del plano láser y la cámara para la toma de imágenes en los diques de escollera.

Tal y como se ha dicho garantizar que el patrón tiene unas coordenadas globales conocidas y que el haz láser es coplanario con el mismo es una condición fundamental para que el proceso de medida sea válido.

La primera condición se ha conseguido montando sobre los diques construidos en el laboratorio un posicionador en 3 dimensiones con una forma similar a la de un puente grúa de una nave industrial. Sobre dos guías de 12 metros *-eje x-* soportadas por pilares anclados al fondo de la piscina se desliza una viga transversal de 5 metros a modo de carro *-eje y-* cuya perpendicularidad se garantiza con un mecanismo de poleas como el paralex empleado en las mesas de dibujo técnico. Nivelando adecuadamente todos los pilares el carro constituye una referencia vertical de la que se pueden tomar medidas hacia abajo *-eje z-*.

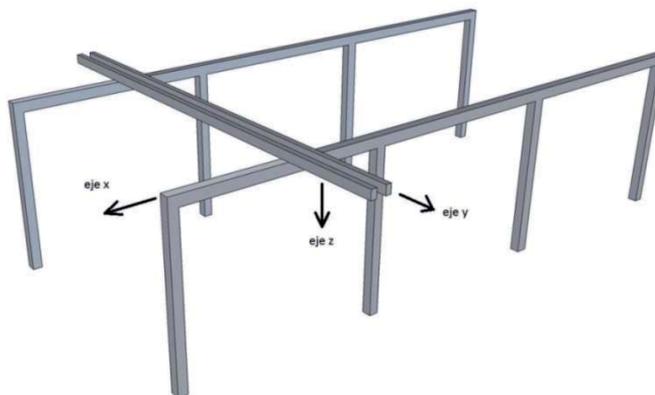


Figura 3.67. Posicionador cartesiano para referenciar las medidas.



Figura 3.68. Imagen real del posicionador en el tanque de oleaje del CITEEC.

El patrón se ha realizado en un material plástico rígido con la particularidad de que la malla de cruces no representa coordenadas del modelo sino del prototipo, correspondientes a 5 x 5 metros en la realidad. Está fijado al carro de traslación del posicionador mediante un bastidor de manera que las coordenadas (y,z) de cada cruz se mantienen en la traslación para tomar imágenes de cada plano x necesario y la coordenada x va cambiando a medida que se toman perfiles desplazando el carro.

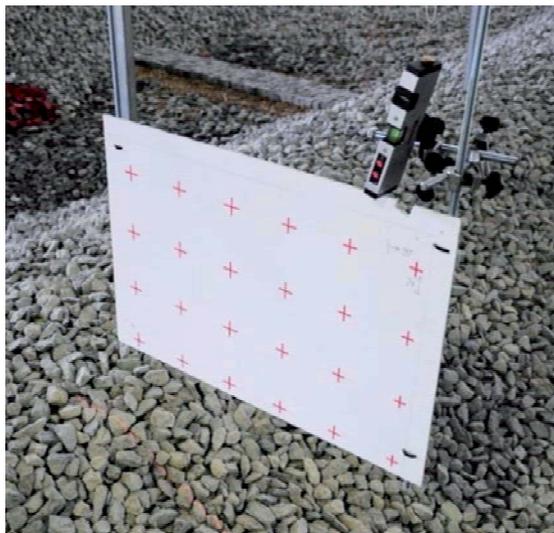


Figura 3.69. Patrón de calibración y láser montados en forma coplanaria en el bastidor.

Para garantizar la segunda condición de coplanaridad se ha hecho el montaje que puede verse en la figura, en la que el láser va montado solidariamente a la estructura de soporte del patrón con una rótula que permite el ajuste fino de su posición.

Para las necesidades de este ensayo concreto se ha espaciado la toma de imágenes –y por tanto extracción de perfiles- cada 25 metros de nuevo en escala de prototipo, pero el procedimiento es igual de válido haciéndolo con perfiles mucho más próximos de los que interpolar una superficie 3D. En cada una de las imágenes se ha incluido además un papel indicando la coordenada x correspondiente -al modo de las claquetas de cine- para no perderse después en un archivo de docenas de imágenes casi iguales.

La imagen que puede verse a continuación se ha tomado bajando las condiciones de iluminación del laboratorio y disparando la cámara a pulso con el zoom en una posición con distorsión despreciable. Se ha tratado de centrar la imagen respecto del eje medio –en horizontal- del patrón para facilitar el trabajo posterior de corrección de perspectiva, pero esto no es crítico.



Figura 3.70. Imagen tomada por la cámara mostrando el patrón y la línea proyectada por el láser.

Una vez tomadas las imágenes será necesario efectuar en ellas una corrección de la distorsión geométrica para tomar medidas directas en ellas. Para este caso en lugar de obtener datos numéricos del perfil y con ellos realizar un gráfico, se ha corregido la distorsión con las imágenes utilizando las herramientas de corrección de perspectiva que incluyen casi todos los programas de tratamiento de imagen y se ha incluido en la imagen una escala gráfica coincidente con las marcas teniendo de ese modo el gráfico del perfil.



Figura 3.71. Imagen con la perspectiva corregida.

El siguiente paso es superponer una malla ortogonal –una imagen sintética equiespaciada a 2,5 metros en prototipo- coincidiendo con las cruces por lo que el perfil puede observarse directamente como gráfico en unos ejes coordenados reales teniendo así una medida semicuantitativa. En la parte superior la malla es de líneas negras y en la inferior de líneas blancas para facilitar la observación directa.

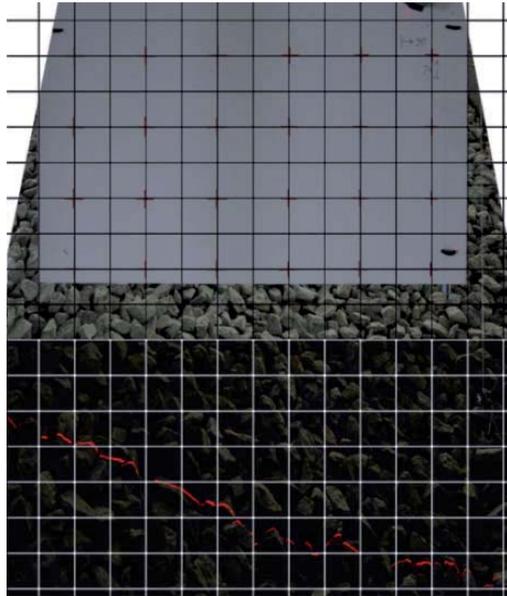


Figura 3.72. Imagen con la perspectiva corregida y una malla ortogonal superpuesta.

Incrementando el nivel de contraste de la imagen puede verse nítidamente el perfil

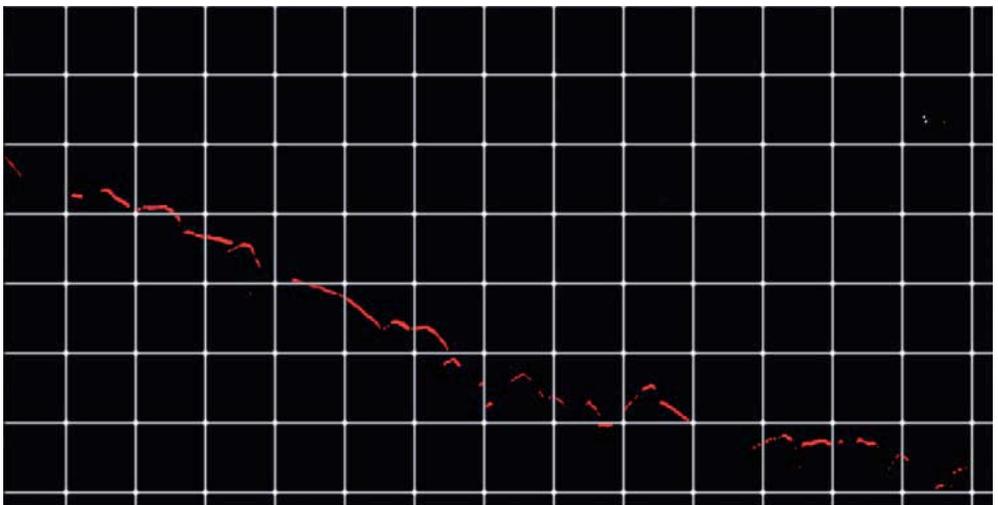


Figura 3.73. Detalle de la imagen con el contraste aumentado para mostrar el perfil

Con un árido de tamaño de varios centímetros existen zonas de sombra en las que el perfil de láser no es observado por la cámara pero el resultado es perfectamente indicativo de la posición global del mismo.

Comparando los perfiles antes y después de cada ensayo puede hacerse una valoración clara de la evolución de los perfiles, establecer si se ha producido un daño estructural e incluso una valoración semicuantitativa del mismo.

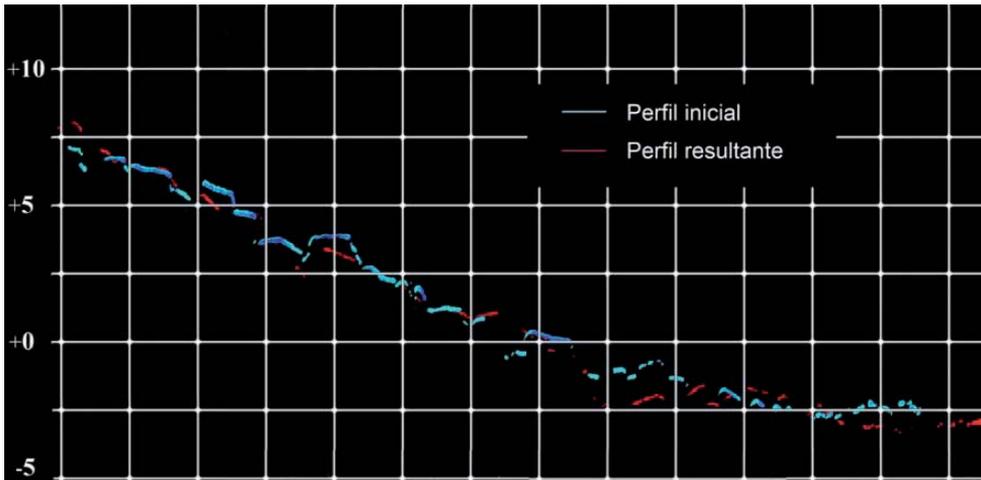


Figura 3.74. Comparación de los perfiles inicial y final para el estudio de daño estructural.

3.6.4. Corrección numérica de la perspectiva. Medidas cuantitativas.

En los ensayos anteriores se han realizado medidas semicuantitativas observando el perfil en forma gráfica sobre unos ejes coordenados. Sin embargo el procedimiento descrito permite hacer medidas cuantitativas identificando marcas en el perfil de calibración para establecer la relación de transformación entre coordenadas físicas y coordenadas de imagen en píxeles (mapeado).

En los ensayos para la determinación de perfiles de la zona de swash del proyecto CoSSeDM se han tomado medidas completamente cuantitativas realizando una calibración con patrón.

El área a medir relativamente grande, de 3 por 4 metros cuadrados llevó a la decisión de montar no un plano completo con marcas de calibración como en el

caso anterior sino una estructura de barras compatible con el sistema de montaje de instrumentación del canal grande del CIEM, de 100 metros de longitud.

Sobre estas barras se colocaron las dianas, y su posición respecto del sistema de referencia del canal se determinó tomando medidas de distancia con una cinta métrica, y de nivelación vertical de las barras con un nivel de precisión digital. Las medidas obtenidas se compararon después con la imagen obtenida por la cámara. Las posiciones en píxeles de las dianas se obtuvieron por observación directa haciendo zoom en los gráficos en Matlab sin hacer una correlación cruzada.

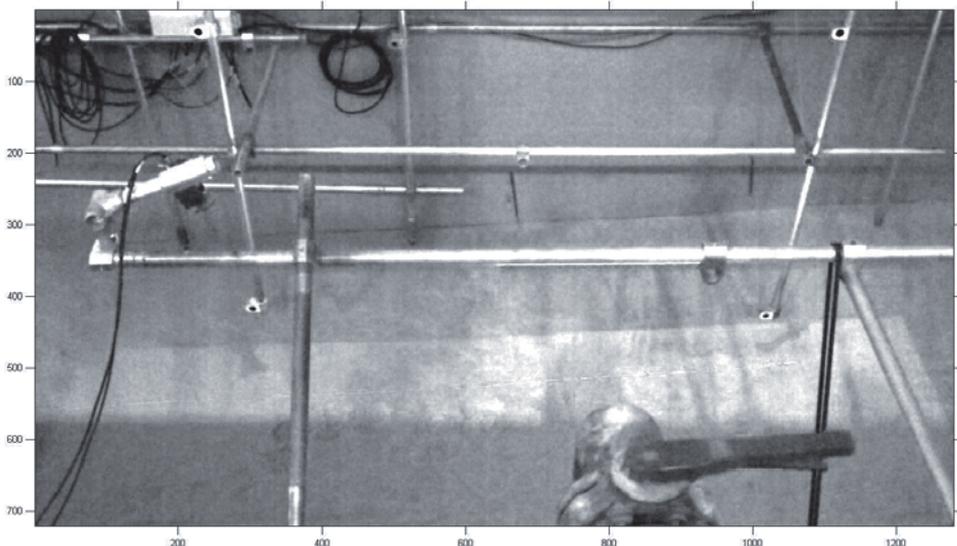


Figura 3.75. Imagen del canal del CIEM mostrando las dianas de calibración.

Las funciones bilineales que relacionan las coordenadas se obtienen con la posición de las dianas, en este caso circulares. En el análisis de los resultados se estudiará el error que se puede cometer al hacer este proceso.

$$x = a_1 + a_2 \cdot i + a_3 \cdot j + a_4 \cdot i \cdot j \quad [59]$$

$$z = b_1 + b_2 \cdot i + b_3 \cdot j + b_4 \cdot i \cdot j \quad [60]$$

Coordenadas en la imagen (pix)		Coordenadas reales (mm)	
i	j	x	z
30	229	19906	3989
32	1121	21750	3989
417	304	19906	2862
427	1018	21748	2862

Tabla 3.3. Coordenadas físicas y en píxeles de las dianas de calibración.

Resolviendo el sistema de 8 ecuaciones y 8 incógnitas se tienen los coeficientes de la transformación

a_1	1.945e+04	b_1	3.940e+03
a_2	-7.885e-01	b_2	-2.615e+00
a_3	2.030e+00	b_3	1.246e-01
a_4	1.300e-03	b_4	2.040e-04

Tabla 3.4. Coeficientes de la función bilineal de transformación.

Cualquier otro punto de la imagen –en particular puntos seleccionados del perfil dibujado por el láser- puede ahora convertirse a unidades físicas.

3.6.5. Perfiles en un video digital de alta definición.

En los ensayos de erosión en el canal del CIEM la zona a medir estaba cubierta de y descubierta manera alternativa por los trenes de oleaje. La manera de poder medir perfiles en los momentos en que queda descubierta es tomar un elevado número de imágenes para asegurarse capturar ese instante. Las cámaras disponibles permitían tomar secuencias de fotografías de 14 megapíxeles a 5 imágenes por segundo o bien grabar video en alta definición (1280 x 720 píxeles) a 30 imágenes por segundo. Entre tener mucha resolución espacial o mucha resolución temporal, se eligió lo segundo y por tanto grabar video.

Las cámaras digitales entregan como archivo de salida imágenes que constituyen matrices de filas y columnas en tres capas de datos, normalmente rojo, verde y azul (RGB). Para ahorrar espacio de archivo y ancho se recurre a diferentes algoritmos de compresión como MPEG. Tanto estos como el posible ruido de la

imagen no afectan a los procedimientos de extracción de perfiles vistos en 3.4. para las imágenes de PIV y que aquí se retomarán. En el caso de un video digital en el mismo se almacenan secuencias de imágenes con una compresión –y por tanto pérdida de calidad- mayor que en el caso de fotografías individuales.

Como se ha visto en el apartado dedicado a las imágenes PIV, todo el procedimiento se basa en la capacidad de la cámara de ‘ver’ la línea proyectada por el láser y del procesado necesario para extraer esa línea de manera automática y cuantificable. Controlando la iluminación de laboratorio, con el láser presentado y unos ajustes ISO de 6400 se ha tomado las imágenes abajo mostradas. La imagen de abajo es un cuadro extraído de un video en alta definición de 1280x720 píxeles. Observada en detalle es muy visible la pérdida de información por la compresión MPEG en forma de bloques de 8x8 píxeles en los que el algoritmo divide la imagen. En ella también son visibles las dianas de calibración.



Figura 3.76. Imagen a color RGB extraída de la grabación de video.

Tal y como se ha dicho, el archivo digital tiene tres capas y el láser empleado, de color rojo, es precisamente en esa capa de la imagen donde se aprecia con más contraste sobre el fondo. Además se empleará la capa verde –la que tiene menos ruido- para eliminar otras posibles estructuras que son visibles en las tres capas.

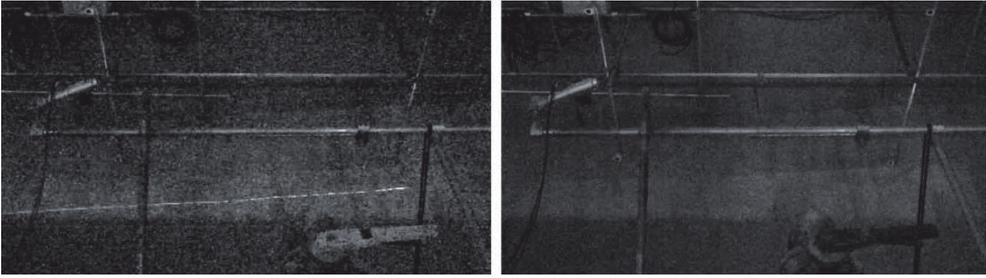


Figura 3.77. Imagen separada por capas de color roja y verde respectivamente.

Si se estudia la estructura de datos de la capa roja como matriz de imagen por columnas puede verse la siguiente representación gráfica de los valores de luminancia. Se muestran una columna de píxeles seleccionada.

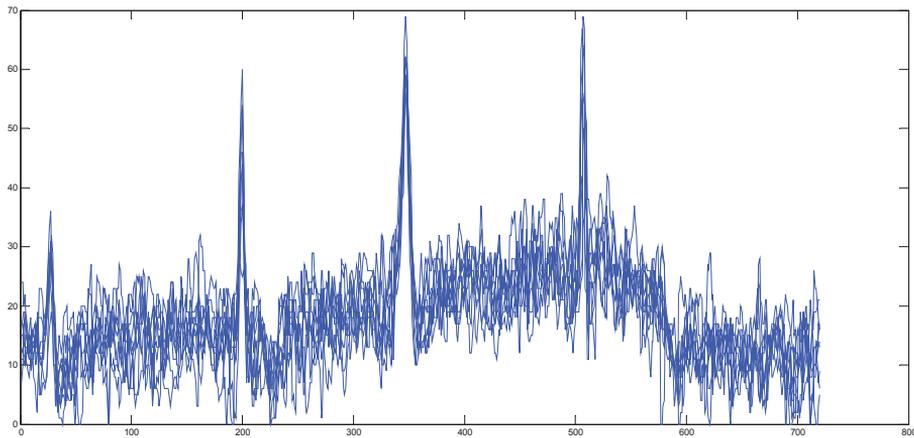


Figura 3.78. Valores de luminancia de una columna de píxeles.

El pico de la izquierda de los tres centrales corresponde a la línea del láser. Los picos laterales corresponden a reflejos en las barras. Se hará la identificación únicamente con ese pico, en la posición que alrededor de la coordenada vertical 200 (unidades píxeles).

Los picos que no corresponden con el láser pueden verse también en la capa verde, y tal como se dijo, restándola de la capa roja pueden ser eliminados.



Figura 3.79. Imagen resultante de restar la capa verde de la capa roja.

Tal y como puede apreciarse la medida tiene bastante ruido, por lo se he ha probado una metodología de doble promediado.

La cámara graba 30 imágenes por segundo. En lugar de tomar una imagen se han tomado secuencias para apilar y promediar en el tiempo, probando con dos números distintos: 30 imágenes (un segundo) y 15 imágenes (medio segundo). El segundo caso, con mejor resolución temporal tomando 2 imágenes promediadas por segundo, favorece el método posterior de estudio de todos los perfiles y fue el finalmente empleado.

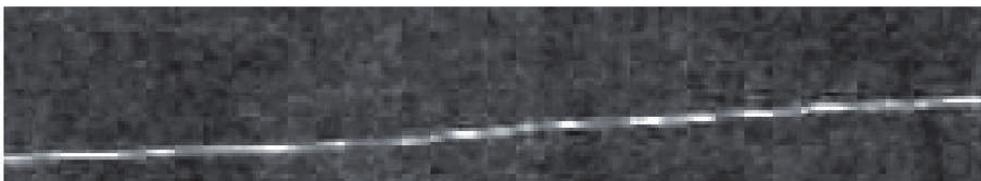


Figura 3.80. Detalle de imagen mostrando los defectos de la compresión MPEG.

A continuación a la imagen resultante, en la que aún son visibles los cuadros de la compresión MPEG, se ha hecho un filtrado espacial que hace una media ponderada con los píxeles vecinos asignando pesos según una campana de Gauss centrada, denominado desenfoque Gaussiano (*Gaussian blur*).

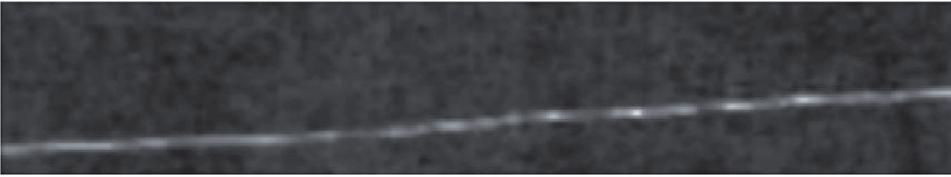


Figura 3.81. Imagen resultante de aplicar el filtro Gaussian blur.

Representando de nuevo la luminancia de una columna de píxeles, se puede ver que el resultado de estas operaciones de promediado y filtrado de las imágenes tiene una forma muy regular por lo que se podrá extraer la línea central con mucha precisión. En cualquier caso y tal como se vio para las imágenes PIV, el procedimiento es robusto y aunque la forma no sea tan regular sigue funcionando.

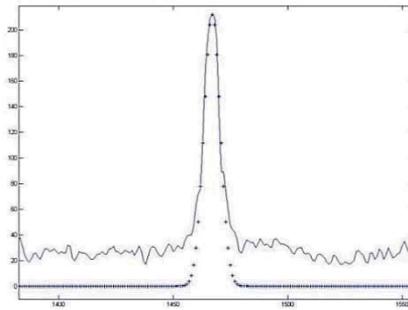


Figura 3.82 Correlación cruzada para la extracción de la línea proyectada por el láser (unidades píxeles en abscisas y luminancia en ordenadas).

El procedimiento de extracción es el visto en el apartado 3.5.2, de correlación cruzada con una campana de Gauss con una anchura similar a la forma de la curva y que se va desplazando. La búsqueda del pico de correlación a nivel de pixel arroja unos resultados como los de la figura, en los que pueden verse claramente los saltos entre valores discretos.

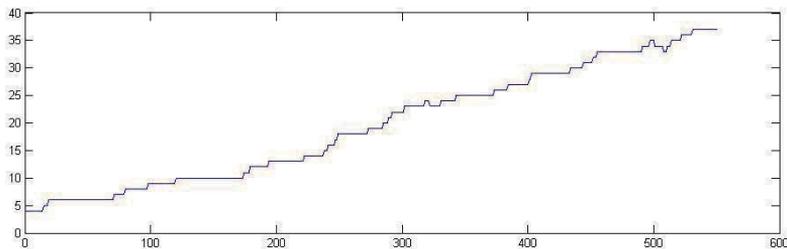


Figura 3.83. Perfil del fondo extraído de la imagen. Unidades en píxeles

Si se realiza una interpolación subpíxel, resulta un gráfico mucho más suave y coherente con la estructura esperada del perfil.

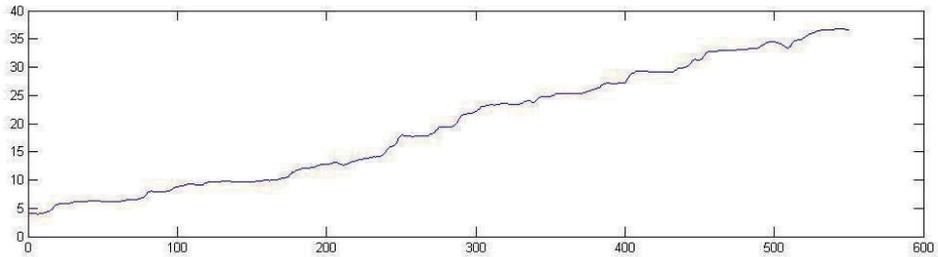


Figura 3.84. Perfil del fondo extraído de la imagen con interpolación subpíxel (unidades píxeles).

3.6.6. Detección de eventos run-up y run-down.

De la observación de los perfiles extraídos por el algoritmo puede extraerse directamente los momentos en los que se obtiene una buena medida (en la parte baja del run down).

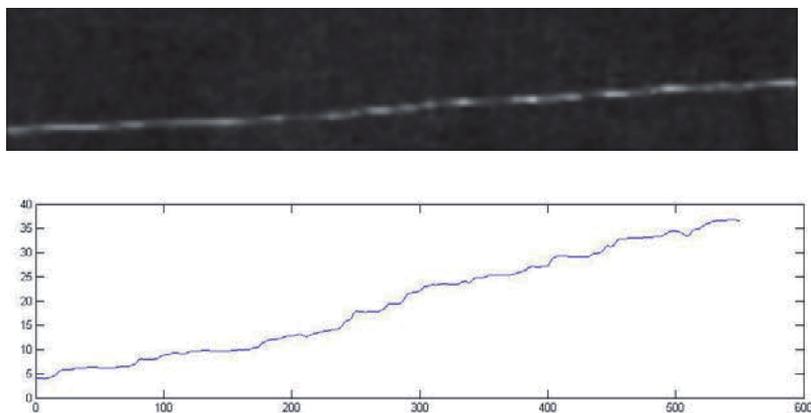


Figura 3.85. Imagen y perfil de fondo correspondientes a un evento run-down (unidades píxeles).

En los momentos en los que la ola cubre el perfil a medir no puede observarse a simple vista en la imagen un perfil claro, y el algoritmo tampoco es capaz de resolverlo tal y como puede verse en la figura 3.87. Sin embargo esta medida

errónea –se sabrá que lo es por comparación con las anteriores- servirá para detectar que se ha producido el run-up por comparación con el último perfil válido.

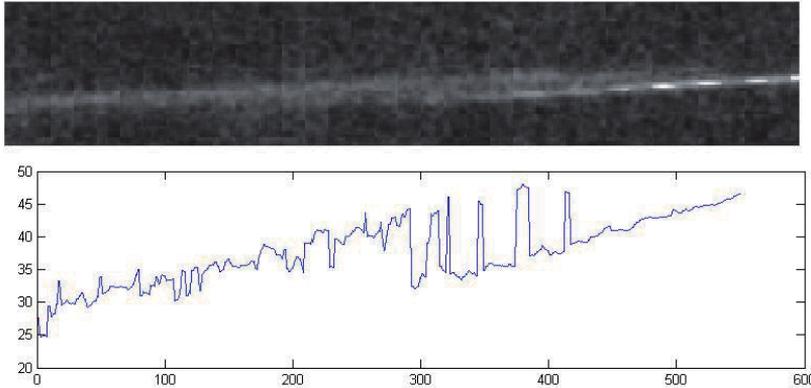


Figura 3.86. Imagen y perfil de fondo correspondientes a un evento run-up (unidades píxeles).

Una manera muy gráfica de mostrar esto mismo es representar la evolución temporal de los perfiles como una superficie. En la figura 3.88 puede verse esta evolución, pudiéndose identificar de manera muy clara en ella los eventos de oleaje y los momentos de retirada en los que es posible obtener un perfil.

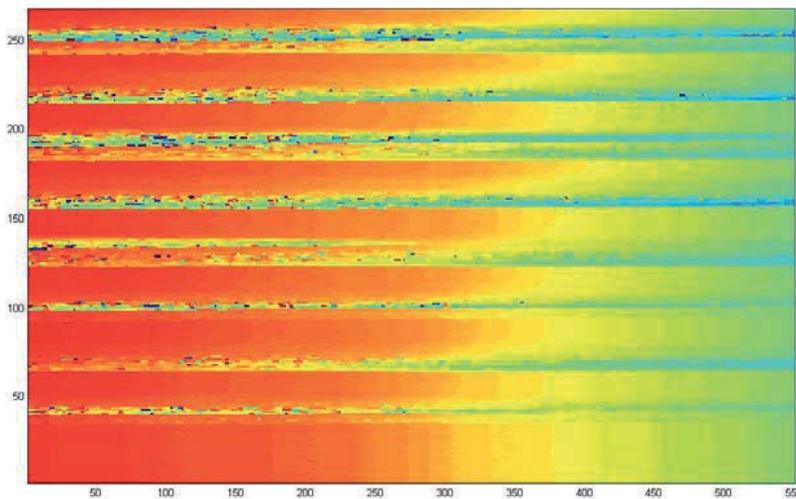


Figura 3.87. Evolución temporal (eje vertical) de los perfiles (eje horizontal y color).

Para tratar de automatizar el proceso de extracción de los perfiles buenos y los momentos en el tiempo en que se producen, se ha realizado una medida de la diferencia media cuadrática (RMS) de dos perfiles consecutivos en el tiempo.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i^t - x_i^{t+\Delta t})^2}{n}} \quad [61]$$

En el momento de representar gráficamente los valores de RMS en el tiempo aparecen nítidamente en la serie los momentos de run-up y run-down.

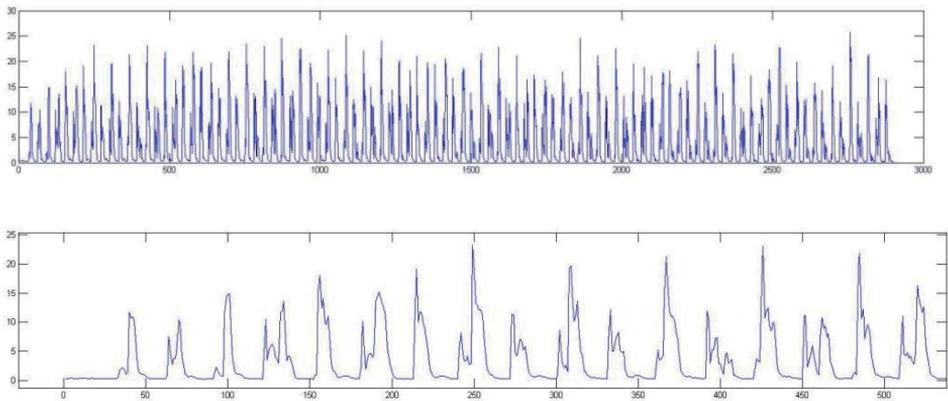


Figura 3.88. Distancia RMS entre dos perfiles consecutivos y detalle (unidades píxeles).

Sin embargo a pesar de que la curva muestra claramente los eventos de oleaje, extraer en la línea temporal el momento preciso para medir un perfil completo (run down) requiere un procesado por pasos de la curva de valores RMS.

Los picos que corresponden en la curva RMS –en azul- a cada evento de ola individual no son únicos ni tienen un valor claramente identificable siempre, por lo que el primer paso de procesado es suavizar la curva por medio de una media móvil. Este promedio no será de tipo simple que sino de tipo centrado y ponderado con un patrón en forma de campana de Gauss que da más peso a los valores más próximos al centro.

$$\bar{r}_i = \frac{\sum_{-n}^n w_i \cdot r_i}{\sum_{-n}^n w_i}$$

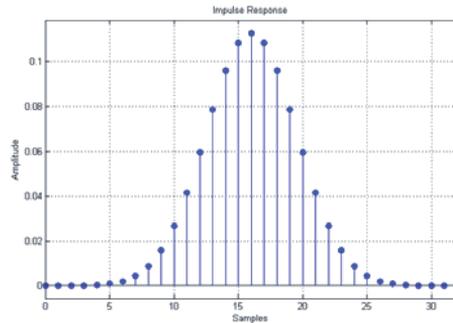


Figura 3.89. Pesos de ponderación w_i para un filtro de suavizado Gaussiano.

Matemáticamente esta operación puede definirse como una convolución con un filtro finito (FIR) y realizarse con el comando correspondiente de Matlab, al igual que la siguiente. El resultado es la curva verde del gráfico de la figura 3.90.

Una vez suavizada la curva el segundo paso será buscar los máximos locales de la misma, realizando para ello una derivada –numérica- e igualándola a cero. La expresión de una derivada numérica –diferencia finita- incluye en el denominador el ancho del intervalo, pero como su valor no es lo que se busca sino únicamente la posición de los valores nulos, no se hará esa división, Por tratarse de una serie discreta de puntos se buscará las posiciones en las que cambia de signo pasando por cero. La serie de diferencias puede verse en color rojo en el gráfico.

$$d_i = \bar{r}_i - \bar{r}_{i-1}$$

Los máximos de la serie suavizada \bar{r}_i se buscarán localizando como se ha dicho los cambios de signo de la serie d_i en los momentos en que pasa de valor negativo a valor positivo (zero up-crossing). Para ello se analizará la serie completa.

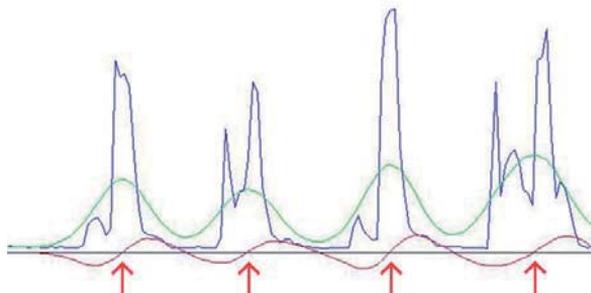


Figura 3.90. Localización de los eventos run-up en la serie temporal de RMS.

A continuación, y una vez dividido el tiempo total del video en intervalos que incluyen una única ola tal y como se puede ver en la figura 3.91, se ha buscado en cada uno de ellos el valor de RMS más bajo (con valores de por debajo de 0,5 píxeles) y se ha extraído un perfil válido y su momento en el tiempo.

El resultado para los primeros 24 minutos de un experimento puede verse en el siguiente gráfico con los perfiles apilados, en los que a pesar de no haber sido convertido a unidades físicas ya pueden verse claramente fenómenos de erosión, acreción y peraltado. También puede observarse unas ondulaciones –ruido de medida- que se estudiarán con detalle en el capítulo 4.

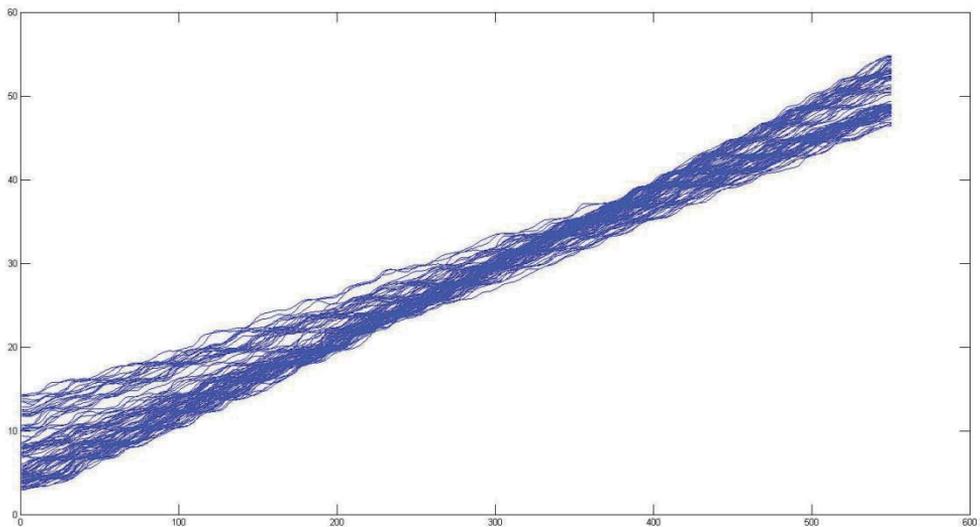


Figura 3.91. Evolución temporal del perfil de playa (unidades en píxeles).

Esta información servirá, una vez cruzada con los datos del resto de instrumentos situados en el canal, para medir la erosión producida por cada uno de los eventos de oleaje individuales y asociarla con la energía del mismo y otros parámetros.

El mapeado a coordenadas físicas puede realizarse antes de la extracción del perfil y trabajar con una imagen corregida o bien al finalizar el proceso y únicamente para a los perfiles necesarios, los extraídos entre ola y ola. La segunda opción ahorra coste computacional significativamente.

Como conclusión, a lo largo de este apartado se ha desarrollado la técnica experimental -basada en el procesado de imagen- para obtener la evolución de perfiles de playa con un láser y una cámara de video convencional. Tal y como se verá en el capítulo 4 la precisión obtenida es muy elevada. Los resultados están siendo empleados para el estudio de erosión y sedimentación en playas de arena con oleaje de temporal.

4. Análisis de datos y comparación de resultados

4. Análisis de datos y comparación de resultados.
 - 4.1. Características de los sistemas de imagen como instrumentos de medida.
 - 4.2. Condiciones de medida.
 - 4.3. Precisión y resolución.
 - 4.3.1. Medidas tomadas con un escáner 3D.
 - 4.3.2. Medidas tomadas con un equipo PIV.
 - 4.3.3. Medidas tomadas con un equipo de imagen convencional.
 - 4.4. Veracidad y calibración.
 - 4.4.1. Calibración de las medidas tomadas con el escáner 3D.
 - 4.4.2. Calibración de las medidas tomadas con el PIV.
 - 4.4.3. Calibración de las medidas tomadas con el equipo de video convencional.
 - 4.5. Ruido. Postprocesado con restricciones morfodinámicas.
 - 4.5.1. Introducción.
 - 4.5.2. Postprocesado de las medidas tomadas con el escáner 3D.
 - 4.5.3. Postprocesado de las medidas tomadas con el equipo de imagen convencional.
 - 4.6. Medidas absolutas y relativas.
 - 4.7. Comparación entre sistemas.

4.1. Características de los sistemas de imagen como instrumentos de medida.

A lo largo del capítulo anterior se ha descrito el desarrollo de una serie de procedimientos –ópticos y de procesado de datos- destinados a la medida de perfiles de fondo en distintas circunstancias. Se trata en definitiva de instrumentos de medida y por tanto se estudiarán sus características como tales, analizando su rango, precisión, veracidad y las diferentes fuentes de error, su cuantificación y posible tratamiento.

Las características más relevantes para los instrumentos descritos son las siguientes, de acuerdo con el glosario de términos ISO que puede encontrarse en la web del Centro Español de Metrología

- Campo de medida o rango, y alcance.
- Veracidad y exactitud.
- Precisión y resolución.
- Repetibilidad.
- Tiempo de respuesta y frecuencia de adquisición.
- Ruido.

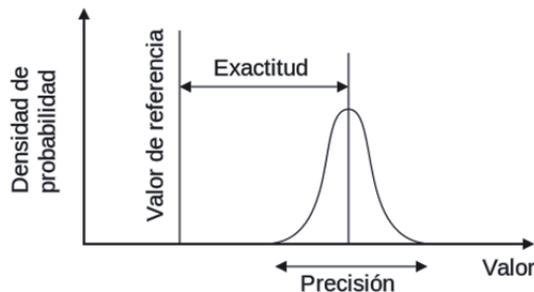


Figura 4.1. Representación gráfica de los conceptos de exactitud y precisión.

En el caso del escáner comercial empleado estos datos son proporcionados por el fabricante, y el único análisis posterior posible es el de la toma de medidas indirectas por cuanto otros posibles errores afecten al resultado global.

El análisis completo de resolución, veracidad y ruido se realizará únicamente en el caso de los instrumentos que se han desarrollado íntegramente en el laboratorio.

El rango –valor máximo y mínimo de las medidas- y el alcance –diferencia algebraica entre los dos- de estos equipos es claramente variable por cuanto la utilización de diferentes distancias focales en las lentes de las cámaras, y su posición más o menos alejada del plano de medida marca el área vista por la cámara. Es por tanto la característica menos relevante a estudiar por cuanto es ajustable a las necesidades de cada ensayo y sin embargo una de sus principales ventajas, al poder usarse un mismo equipo para tomar medidas con rangos muy distintos. A lo largo del estudio se ha trabajado con áreas desde 40 por 30 centímetros hasta 3 por 2 metros.

En donde sí interviene definitivamente el rango es en la magnificación de imagen puesto que ésta marca el mapeado de píxeles a unidades físicas, y por tanto el paso de resolución en píxeles a resolución de medida en distancias reales. Su cálculo puede realizarse por sencillas funciones trigonométricas a partir de las distancias focales empleadas y las distancias al plano de medida, pero en general se hará en el proceso de calibración correspondiente.

La resolución de todos los equipos presentados depende esencialmente de la posibilidad de localizar un perfil en una imagen digital y por tanto la resolución real en unidades físicas estará relacionada con la resolución del sensor de imagen empleado y la magnificación óptica M . En el caso más sencillo de una imagen tomada de manera ortonormal al plano de medida se tiene que la relación entre el área observada y la medida mínima a nivel píxel dada por

$$\text{Resolución (mm)} = M \cdot \text{Resolución (píxeles)} \quad [62]$$

En un sensor de 4288 x 2848 píxeles como el de la Nikon D5000 utilizada como equipo de bajo coste adaptado, tomando como referencia el eje horizontal y para un área vista –por simplicidad- de 429 milímetros en el mismo eje, la magnificación será de 0,1 mm/píxel y la resolución de medida 0,1 mm.

Tomando en otro ejemplo el sensor de 1280x1024 píxeles de la cámara Flowmaster 3S del equipo PIV para un área similar la resolución baja a la cuarta parte aproximadamente.

Estos resultados pueden mejorarse por debajo de la resolución de un píxel mediante las técnicas descritas como interpolación subpíxel en el apartado 2.4.4

del Estado del Conocimiento. Sin embargo el cálculo teórico de la misma es extraordinariamente complejo y depende de muchos factores como son

- La difracción de la luz en el diafragma del objetivo.
- La dispersión de la luz al incidir en el objeto iluminado y el color del mismo.
- La profundidad de imagen teórica en bits del sensor digital (8 bits para un archivo jpg/mpg y 12 bits para la cámara Flowmaster 3S).
- La profundidad de imagen real obtenida en función del rango dinámico de la luminancia, habitualmente inferior a la del sensor.
- La posible saturación del sensor de imagen.
- El ruido electrónico en la imagen.

Es por eso que no se realizará un cálculo teórico sino un análisis estadístico de errores basado en observaciones en el caso de las imágenes obtenidas por las cámaras en el laboratorio.

Entre las características dinámicas de un equipo de medida destaca el tiempo de respuesta porque condiciona indirectamente otras como la frecuencia de adquisición de imágenes. La regla fundamental para esta característica es que el tiempo total de respuesta que tarda un instrumento en tomar una medida debe ser mucho menor –al menos un orden de magnitud– que el tiempo característico de variación del fenómeno físico a medir. A lo largo de este estudio se ha trabajado con fenómenos relativamente lentos en los que los tiempos de medida podían alargarse como es el caso de la erosión fluvial, y otros en los que la frecuencia de adquisición necesaria era mucho más elevada como en el estudio de la zona de swash de un perfil transversal de playa.

4.2. Condiciones de medida.

Junto con las características de un equipo de medida lo más importante para garantizar su correcto uso es un estudio detallado de las condiciones de medida.

Para cualquier instrumento de medida será necesario por tanto conocer bien el fenómeno físico a medir y los factores ambientales que afectan al fenómeno y al propio instrumento de medida. Es necesario por tanto conocer los procesos

físicos –en este caso ópticos- y los algoritmos empleados en el procesado para conocer la influencia de posibles fenómenos externos en el resultado de medida.

También es necesario conocer en que grado el proceso de medida afecta a la propia medida, si bien la principal característica de los métodos empleados es que en la práctica no son intrusivos.

Entre los factores que afectan a la toma de medidas a lo largo de los capítulos anteriores se ha enumerado los siguientes.

- La turbidez del agua, y su límite para tomar medidas en función de la potencia del láser.
- La distorsión introducida por la refracción y la posibilidad –o no- de restituirla, así como sus variaciones cuando la lámina de agua es inestable.
- Las condiciones de iluminación del laboratorio para elevar el contraste del haz láser proyectado sobre la superficie.
- El tamaño de árido del fondo de sedimentos a estudiar.
- La posición y orientación relativa del haz láser, la o las cámaras y el fondo de sedimentos.

4.3. Precisión y resolución.

4.3.1. Medidas tomadas con el escáner 3D.

Se estudiará ahora la resolución de los diferentes equipos de medida empleados y se comparará con las alternativas disponibles.

Las medidas tomadas por el escáner comercial Polhemus 3D en el punto 3.2 y 3.3 tienen una precisión dada por el propio aparato y por el proceso posterior puesto que se trata de medidas indirectas. La medida depende del valor dado por el escáner corregido en función de la posición de la lámina de agua medida por una sonda de calados por ultrasonidos. Para el caso bidimensional se obtuvo la expresión

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} h \quad [63]$$

La precisión globales, de acuerdo con ello estará determinada 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 3.23 y 3.29 respectivamente.

Realizando un análisis de errores de acuerdo con la teoría de Gauss en la ecuación e introduciendo los valores obtenidos en la calibración, obtenemos el error total en la medida de las elevaciones reales del fondo.

$$\Delta z_r = \sqrt{\left(\frac{1}{C_2} \cdot \Delta z_m\right)^2 + \left(\frac{C_1}{C_2} \cdot \Delta h\right)^2} \quad [64]$$

Introduciendo el error en la medida del escáner $\Delta z_m = 0,5$ milímetros, y el de la medida del calado $\Delta h = 0,5$ milímetros resulta un error global

$$\Delta z_r = 0,7 \text{ mm}$$

Para el caso del mismo escáner en el caso de medidas de superficies en tres dimensiones se tiene una expresión dada por

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} \cdot h - C_3 \cdot y^2 \quad [65]$$

En donde y es la coordenada transversal medida por el escáner con la misma precisión que z_m y C_3 es una constante obtenida durante la calibración con un valor de $39,08 \cdot 10^{-4}$.

La precisión de la medida indirecta es ahora

$$\Delta z_r = \sqrt{\left(\frac{1}{C_2} \cdot \Delta z_m\right)^2 + \left(\frac{C_1}{C_2} \cdot \Delta h\right)^2 + (C_3 \cdot 2y \cdot \Delta y)^2} \quad [66]$$

Que para el borde exterior de la lámina con $y = 20$ mm resulta del mismo orden que en el caso 2D.

$$\Delta z_r = 0,7 \text{ mm}$$

La resolución de los datos numéricos entregados por los equipos de medida –la división menor de la escala- es sensiblemente menor, inferior a 0,1 mm, por lo que se tomará como estimación del error de medida el mayor de los dos valores, esto es 0,7 mm.

4.3.2. Medidas tomadas con un equipo PIV.

Tal y como se introdujo en el punto 4.1, la resolución de medida a nivel de píxel de un equipo de imagen viene determinada por la magnificación y por la resolución del sensor de imagen. Se estudiarán los dos casos vistos con medidas cuantitativas.

Para el caso de las imágenes tomadas con PIV, la resolución de la cámara del sistema Flowmaster 3S es de 1280x1024 píxeles y un área vista de 38x30 centímetros aproximadamente, la magnificación es 0,29 mm/píxel y la resolución de medida por tanto es de 0,3 mm.

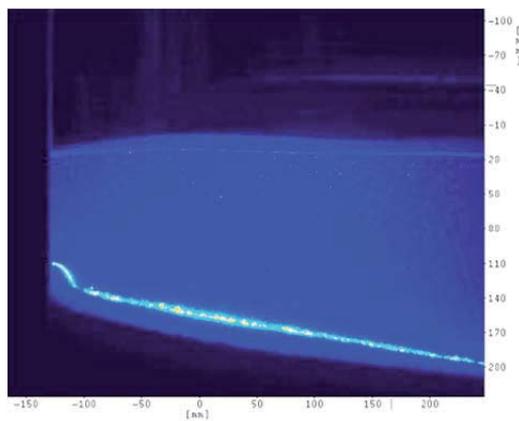


Figura 4.2. Imagen PIV mostrando la posición del fondo iluminada por el láser.

Además de realizar una interpolación subpíxel y tal y como se vio en el punto 3.4.2, se probó la alternativa de intentar reducir el coste de cálculo tomando los

valores sin interpolar y suavizándolos realizando una media móvil con sus vecinos con una diferencia entre ambas estrategias de 0,5 píxeles.

En cualquier caso y como la precisión de 0,3 milímetros –mejorada a 0,15 por la interpolación subpíxel o el suavizado- excedían con mucho las necesidades del estudio se dio por válida sin realizar medidas repetidas para poder hacer un análisis estadístico. La mejor estimación disponible del error de medida es por tanto esa, una precisión de 0,15 mm. Sí se realizaron sin embargo medidas simultáneas con el escáner comercial y los resultados se compararán al final de este capítulo.

4.3.3. Medidas tomadas con un equipo de imagen convencional.

Durante el estudio del proyecto CoSSeDM se adaptó de principio a fin un láser y una cámara comerciales y es en este en el cual se dispone de una mayor cantidad de datos para hacer un mejor análisis estadístico de las medidas.

La resolución de medida se establece en función de las imágenes analizadas procedentes de un video en alta definición de 1280 x 720 píxeles y la magnificación de imagen.

Al no tratarse de una toma ortogonal como en el caso del PIV, diferentes áreas de la imagen tendrán diferentes valores de magnificación. En el área de interés de la imagen donde se encuentra el perfil de un valor aproximado de $M=2,9$ mm/píxel. Redondeado a una cifra significativa de acuerdo con las normas de expresión de un error se tiene una resolución de medida de 3 milímetros.

Sin embargo observando las gráficas de la figura 4.3 del perfil extraído a nivel de píxel y a nivel subpíxel parece claro que la resolución de medida puede mejorarse.

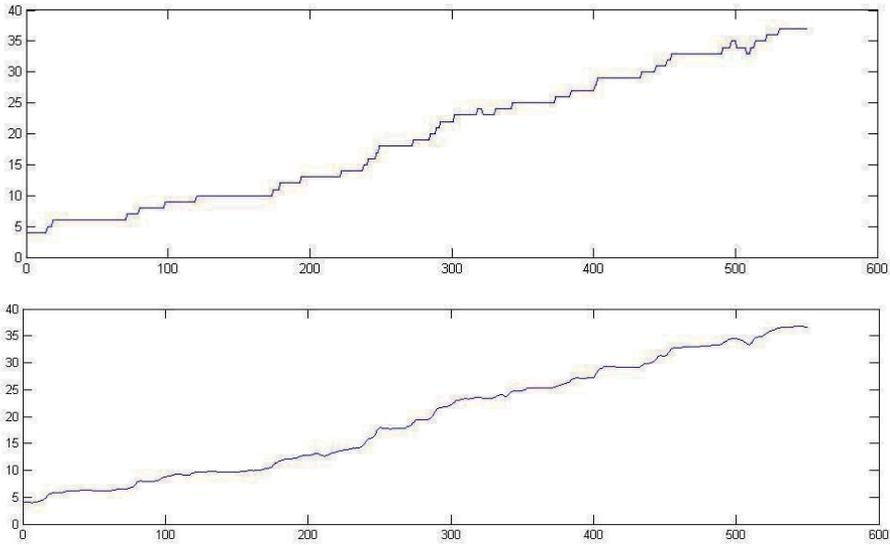


Figura 4.3. Perfiles medidos tomando los máximos y con interpolación subpíxel (unidades píxeles).

Para estudiar la repetibilidad de la medida con interpolación subpíxel, en lugar de un análisis teórico se estudiaron varios perfiles (N=10) consecutivos en un rundown para compararlos haciendo un promedio y estimar el error aleatorio.

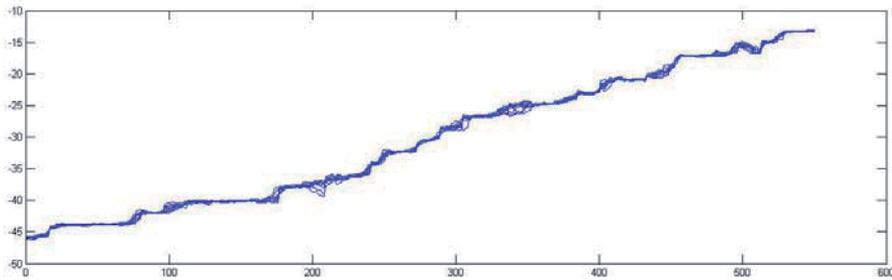


Figura 4.4. Resultados de medida de 10 perfiles consecutivos (unidades píxeles).

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N} \quad [67]$$

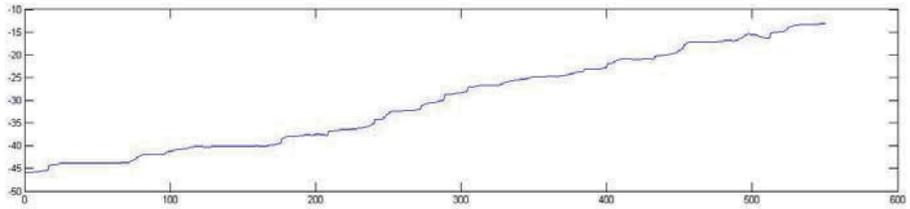


Figura 4.5. Promedio de 10 perfiles consecutivos (unidades píxeles).

Para un conjunto de 10 perfiles, el error para cada valor de columna es

$$E = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N \cdot (N-1)}} \quad [68]$$

Representándolo por columnas tenemos

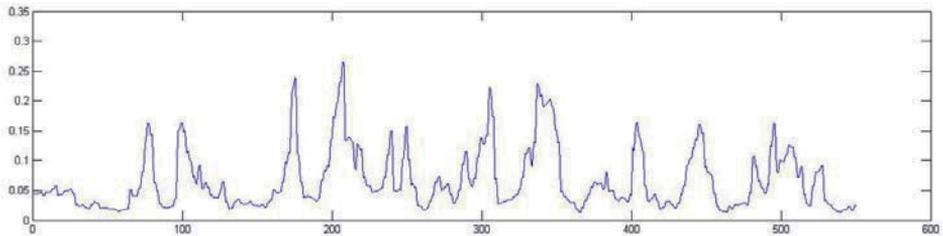


Figura 4.6. Error RMS (unidades en píxeles) en la medida de los perfiles para el caso N=10.

Para una situación en la que no puedan extraerse 10 perfiles en un rundown, con N=5 se tiene un error

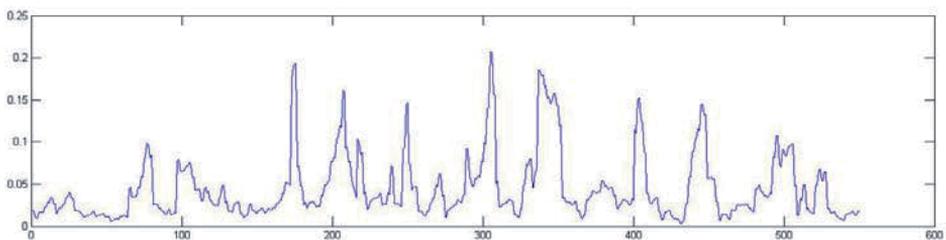


Figura 4.7. Error RMS (unidades en píxeles) en la medida de los perfiles para el caso N=5.

En cualquier caso el error es siempre inferior a 0.33 píxeles (valor inverso de la magnificación de imagen M=3) por lo que el promedio puede tomarse como una medida con una precisión de 1mm o mejor.

4.4. Veracidad y calibración.

4.4.1. Calibración de las medidas tomadas con el escáner 3D.

La veracidad de una medida, cuantificada por los errores sistemáticos, se determina y puede ser mejorada mediante los procedimientos de calibración.

En el caso de las medidas tomadas con un escáner se ha realizado una calibración con tres formas de geometría conocida:

- El fondo plano del canal, con una variación sobre un plano ideal de 0,1 mm.
- Un objeto de geometría conocida con forma irregular, que se ha empleado para comparar las medidas con y sin agua presente.
- Un objeto de geometría conocida mecanizado con una precisión de 0,01 mm.

En los tres casos las tolerancias de las formas son inferiores a la precisión de medida por lo que se consideran válidas como patrones.

Las medidas posteriores a esa calibración dependen de que se pueda mantener la posición del escáner –en concreto su distancia en vertical al fondo del canal- a lo largo de los ensayos. Para ello se ha empleado un bastidor rígido con una tolerancia de desplazamiento menor de 0,1 mm por lo que las medidas también se pueden considerar válidas y la resolución de medida puede tomarse como cuantificación también del error sistemático.

4.4.2. Calibración de las medidas tomadas con el PIV.

En el caso de las medidas tomadas por el PIV y la cámara comercial la calibración se hace con un patrón de marcas que deben estar en una posición fijada en un plano. El patrón ha sido impreso con una impresora láser y la separación de las marcas ha sido comprobada con un pie de rey de precisión 0,1 mm. Además el patrón puede ver muchas más cruces de las necesarias para obtener la función de mapeado por lo que las medidas redundantes las emplea para una mejora estadística por mínimos cuadrados.



Figura 4.8. Patrón de calibración para las medidas del PIV.

Una vez realizada la calibración la calidad de las medidas depende de que se mantenga en su sitio la cámara. Para garantizar esto se ha empleado un trípode y una rótula con una capacidad de carga de 5 kilogramos que, no permiten que la cámara –que pesa menos de un kilogramo- se mueva. Además el obturador de la misma es electrónico por lo que no tiene lugar ninguna vibración en la toma de imágenes.

4.4.3. Calibración de las medidas tomadas con el equipo de video convencional.

En el caso de las medidas tomadas con la cámara digital para los diques de escollera se trataba exclusivamente de medidas semicuantitativas por lo que el error no es medible. La precisión de medida se ha ajustado a las necesidades del proyecto en las que lo único necesario era saber si se había producido o no daño en una serie de secciones transversales del tronco del dique y ese objetivo se ha conseguido.

En el caso de las medidas de erosión de la zona de swash la calidad de la medida depende de la calibración y esta tiene dos partes:

- Determinación de la posición física de las dianas en el canal de oleaje.
- Determinación de la posición en píxeles de las dianas en la imagen digital.

El primer proceso se realizó mediante la medida manual con respecto a la referencia marcada por el carro de traslación de instrumentación sobre el canal, y una cinta métrica de precisión 1mm.

Para la determinación de la posición de las dianas en la imagen se han hecho las medidas directamente sobre ésta con la escala gráfica que presenta Matlab al importar las imágenes. Las dianas son círculos con unas dimensiones físicas de 25 milímetros y tamaño en imagen aproximado de 10 píxeles. Esta precisión corresponde en medidas físicas a algo menos de 3 mm tal y como se vio. En la figura 3.75 puede verse una ampliación de detalle de la figura 4.3 para ver este proceso de obtención de las coordenadas.

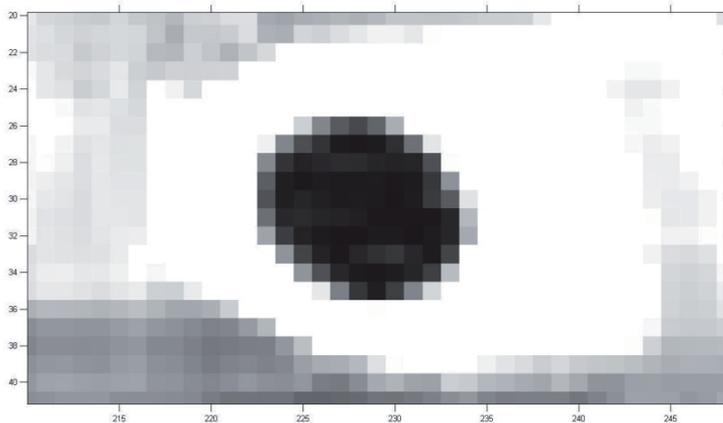


Figura 4.9. Detalle ampliado de la imagen de las dianas de calibración mostrando una de ellas.

El error de calibración total haciendo la suma cuadrática de ambos resulta de 3 mm.

Para mantener este error constante esta vez no es tan importante que la posición relativa de la cámara y las dianas se mantenga constante porque éstas aparecen en todas las imágenes de modo que puede hacerse una calibración en cada medida.

Sin embargo la posición de las dianas y la cámara se ha mantenido con los soportes fuertemente anclados a la estructura del canal y la grabación de video en lugar de toma de fotos, que no hace vibrar la cámara. Esto puede observarse directamente en las imágenes extraídas del video, en las que la posición de las dianas permanece constante.

4.5. Ruido. Postprocesado con restricciones morfodinámicas.

4.5.1. Introducción.

Los procesos de medida estudiados son sensibles al ruido de medida procedente de varias fuentes. En la mayor parte de los casos el ruido es aleatorio y puede ser eliminado de manera estadística haciendo un promediado espacial y/o temporal.

Sin embargo en ocasiones el ruido responde a un patrón y los datos esperados de la medida tienen una forma conocida, de modo que éste conocimiento puede aplicarse al postprocesado de datos, restringiendo las variaciones permitidas a los mismos. Es una técnica que se utiliza habitualmente en PIV aplicando por ejemplo la ecuación de continuidad a los datos experimentales.

4.5.2. Postprocesado de las medidas tomadas con el escáner 3D.

Para el proceso de medida con el escáner comercial se pudo observar que cuando la lámina de agua es reducida se produce una inestabilidad en la misma con forma de ondas. Estas ondas perturban la medida tal y como se puede ver en el gráfico

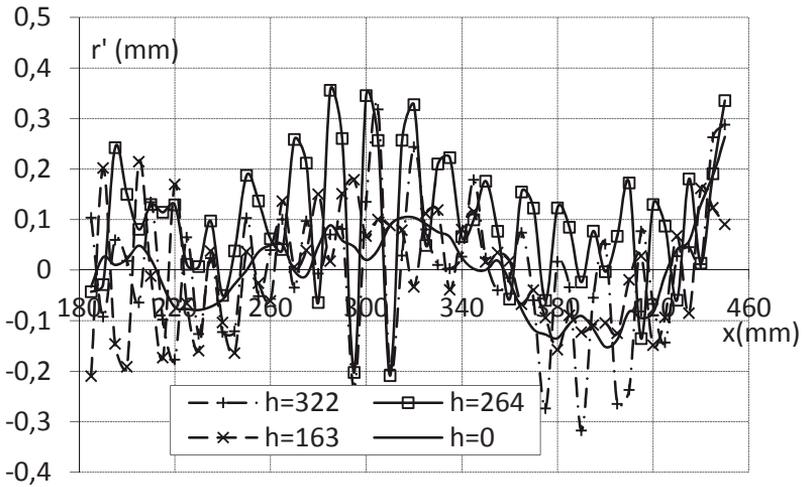


Figura 4.10. Oscilaciones en la medida del escáner 3D bajo una lámina de agua inestable.

Sin embargo el conocimiento de los datos –en este caso se trataba de un fondo metálico plano, pero para cualquier otro fondo es claro que esas ondulaciones no son reales- hace que el ruido sea muy identificable en ellos y en este caso muy fácilmente filtrable. Una media móvil centrada con el mismo periodo que las ondas sumadas a los datos –equivalente a un filtro paso-bajo- elimina el ruido manteniendo la estructura de los datos.

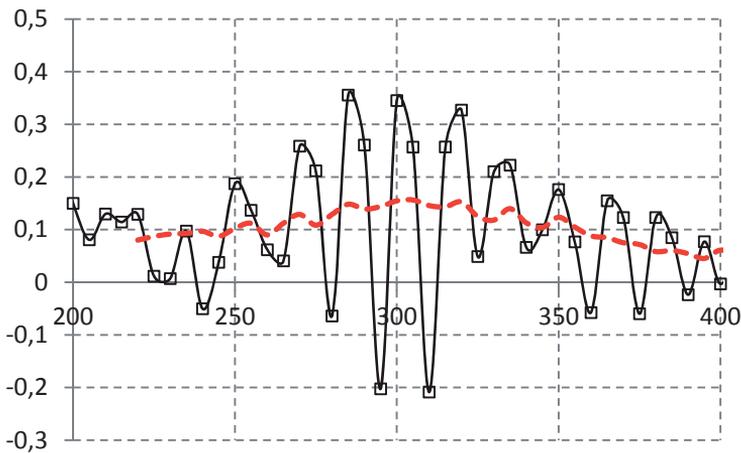


Figura 4.11. Datos obtenidos por el escáner filtrados con una restricción morfodinámica.

4.5.3. Postprocesado de las medidas tomadas con el equipo de video convencional.

En el caso de los perfiles de playa extraídos de la grabación de video, la fuente de ruido es el algoritmo de compresión del formato de archivo MPEG, tal y como se vio. La imagen ampliada permite ver los bloques 8x8 de la compresión y los saltos de 2 píxeles visibles en el gráfico.

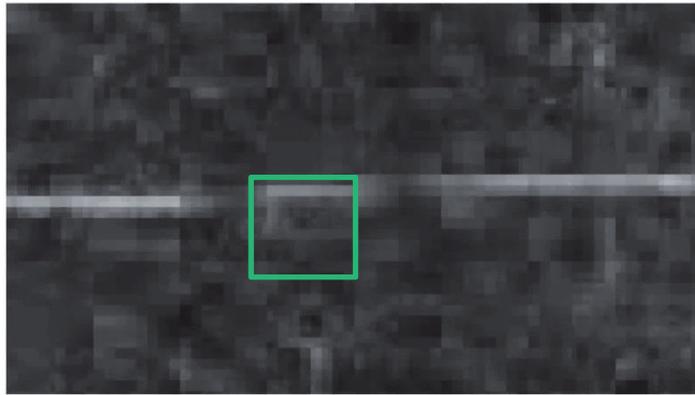


Figura 4.12. Detalle de una imagen de video mostrando los defectos de la compresión MPEG.

La solución para evitar esta fuente de ruido es utilizar una cámara con una salida de video con una compresión menor, pero los datos ya tomados pueden procesarse aplicando de nuevo restricciones morfodinámicas.

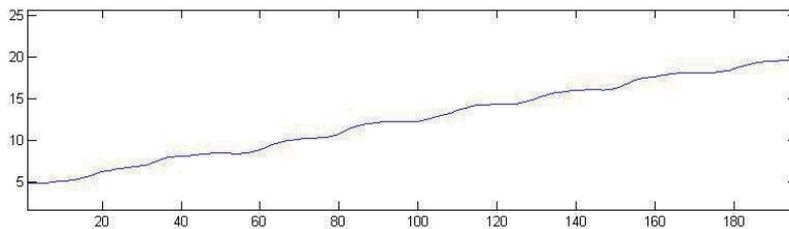


Figura 4.13. Perfil obtenido por el equipo de video convencional (unidades píxeles).

De la observación visual directa del perfil y de la morfología esperada cuando está sometido a un proceso de erosión por oleaje se deduce que los datos no tienen esa ondulación, que puede eliminarse haciendo otra vez una media móvil de 8 datos –el tamaño de los bloques de la compresión-. El conocimiento previo de la estructura de los datos de nuevo permite separar el ruido de los datos relevantes.

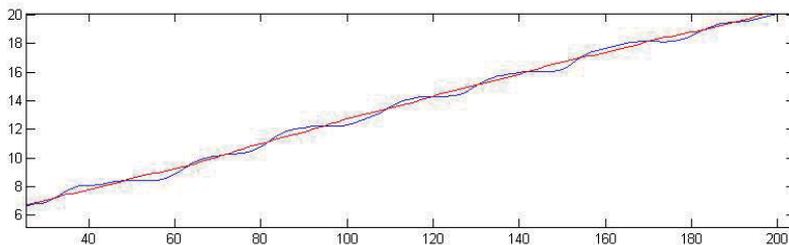


Figura 4.14. Perfil filtrado mediante una restricción morfodinámica (unidades píxeles).

El periodo de la media móvil en ambos casos se ha obtenido de manera manual, pero puede ser fácilmente automatizado a través de una transformación de Fourier.

El resultado de la evolución del perfil después del filtrado es el de la figura siguiente

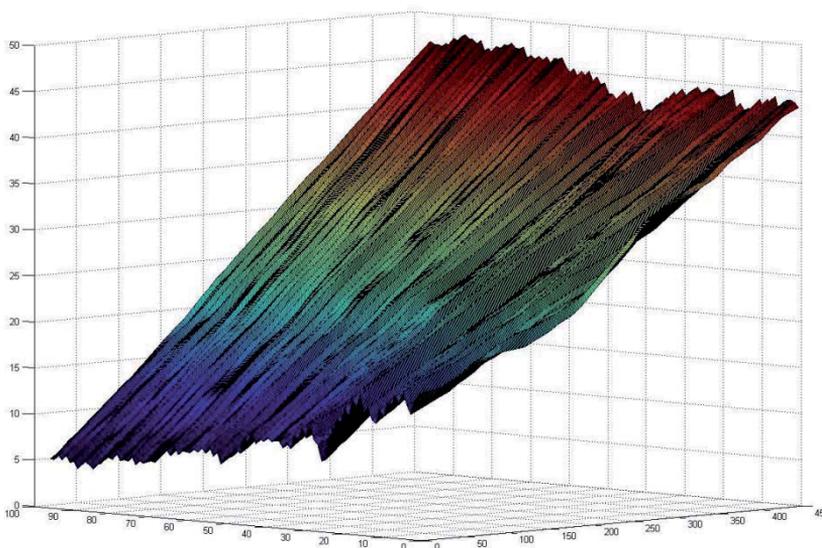


Figura 4.15. Evolución temporal del perfil de playa con los datos filtrados (unidades píxeles).

4.6. Medidas absolutas y relativas.

La precisión de las medidas absolutas para determinar la posición de la superficie respecto de unos ejes coordenados definidos en el canal del CIEM en el estudio de la zona de swash es como se ha visto de 3 milímetros.

Sin embargo en los estudios de procesos de erosión, para relacionar este proceso con sus causas es tanto o más importante conocer la diferencia entre dos perfiles que su valor absoluto, porque esa diferencia es precisamente la medida de la erosión o acreción producida en ese intervalo de tiempo.

Si las cámaras se mantienen firmemente sujetas a la hora de tomar las imágenes, aunque la posición absoluta de la superficie sea conocida con un intervalo de confianza igual al error sistemático, éste se mantiene constante en dirección y sentido durante todo el experimento. Así la posición relativa de los perfiles respecto de cualquier referencia, típicamente el perfil inicial, puede conocerse con un intervalo de confianza igual a la resolución del sistema.

Tal y como se ha visto en el caso de la erosión de la zona de swash, el error sistemático es de 3 mm y la resolución de medida de 1 mm, y ésta será la realmente interesante para conocer la cantidad de sedimento movilizado por cada ola o grupo de olas.

4.7. Comparación entre sistemas.

Se presentará ahora una tabla resumen similar a la mostrada en el estado del arte para los sistemas clásicos y añadiendo los sistemas ópticos presentados

Tipo de sensor	Resolución vertical (mm)	Resolución horizontal (mm)
Puntual de conductividad	0,2	5
Puntual óptico	0,2	10
Puntual ultrasónico	0,1	10
Puntual de contacto	0,1	2
Escáner 3D	0,7	0,7
PIV	0,15	0,15
Equipo bajo coste	1	1

Tabla 4.1. Comparación de sistemas de medida clásicos y los presentados en esta Tesis Doctoral.

Como puede apreciarse la principal mejora se encuentra en la resolución horizontal, siendo los sistemas ópticos capaces de llegar a la misma resolución horizontal que vertical. Esto permite medir no solo la elevación del perfil sino su forma en planta lo que es particularmente útil en el estudio de formas como las ondulaciones del fondo o ripples.

La precisión obtenida por el equipo PIV y el de bajo coste aunque diferentes en valor absoluto son similares en términos relativos si se tiene en cuenta el campo de medida de uno y otro sistema. Si se traslada el equipo de bajo coste trabajando en un pequeño canal de laboratorio puede conseguirse una resolución de 0,1mm.

5. Aplicaciones

5. Aplicaciones.

5.1. Resumen de aplicaciones prácticas.

5.2. Validación de un modelo numérico de transporte de sedimentos.

5.2.1. Presentación.

5.2.2. Instalaciones de la ETSI Caminos de la UDC.

5.2.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.

5.3. Análisis de daño en el tronco de un dique en talud sometido a con oleaje perpendicular.

5.3.1. Presentación.

5.3.2. Instalaciones de en sayo en el tanque de oleaje del CITEEC UDC.

5.3.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.

5.4. Morfodinámica de la zona de swash. Proyecto CoSSeDM.

5.4.1. Presentación.

5.4.2. Equipamiento e instrumentación empleados en el proyecto CoSSeDM. Instalaciones del CIEM UPC.

5.4.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.

5.1. Resumen de aplicaciones prácticas.

Las aplicaciones prácticas de las técnicas de medición de fondos de sedimentos desarrolladas han respondido a necesidades reales de los laboratorios de la ETS de Caminos, Canales y Puertos y del CITEEC –ambos casos de la UDC- así como un trabajo de colaboración en un proyecto europeo dentro de la iniciativa Hydralab.

Las técnicas desarrolladas con el escáner 3D y el PIV se emplearon para la validación de un modelo numérico de transporte de sedimentos dentro del campo de la ingeniería fluvial. También, y como aplicación práctica del citado modelo, para estudiar la colmatación de sedimentos aguas arriba de un vertedero de aforo y la modificación de su curva de gasto por este motivo.

Las técnicas desarrolladas con el equipamiento convencional de bajo coste adaptado al laboratorio se emplearon para dos trabajos relacionados con la ingeniería portuaria y costera:

- Análisis de daño en un dique de escollera sometido al oleaje. A pesar de que se aparta conceptualmente de los lechos de sedimentos, el problema de medición de la evolución de un perfil de escollera tiene similares condicionantes y puede ser resuelto con las mismas técnicas.
- Análisis de la evolución del perfil de una playa de arena sometida a oleaje de temporal en condiciones erosivas y acretivas. Los perfiles no estaban en este caso permanentemente sumergidos sino en la zona cubierta y descubierta por las olas, la zona de swash.

5.2. Validación de un modelo numérico de transporte de sedimentos.

5.2.1. Presentación.

La primera aplicación práctica de las técnicas descritas en el capítulo 3 fue la validación del modelo numérico de transporte de sedimentos en ríos y canales, trabajo que constituyó la tesis doctoral de uno de los codirectores de este trabajo Enrique Peña (2002a). Se trata de *un modelo numérico bidimensional desacoplado de flujo y transporte de sedimentos, que evalúa en régimen no permanente la*

hidrodinámica y el transporte de sedimentos utilizando el Método de los Volúmenes Finitos.

El modelo es válido para el estudio del transporte de fondo de sedimentos no cohesivos y la validación experimental del mismo se realizó con este tipo de sedimentos. Los sedimentos fueron lavados para eliminar los finos y que el agua mantuviese una turbidez suficientemente baja para poder emplear el equipo PIV para la medida de velocidades del agua y el escáner para la medida del perfil del fondo.

Durante este trabajo de validación se han empleado las dos primeras técnicas presentadas en el capítulo 3:

- Escáner 3D y los algoritmos desarrollados para restituir la desviación producida por la refracción en los datos del fondo.
- Velocímetro de Imagen de Partículas (PIV) y algoritmos para la extracción del perfil del fondo.

Si bien el modelo numérico obtiene información tridimensional del fondo, en el citado trabajo los resultados del escáner 3D fueron estudiados únicamente en el plano central del canal para obtener el correspondiente perfil 2D y no en tres dimensiones. Este plano central del canal y de simetría del haz láser del escáner se hicieron coincidir con el del PIV para de esta forma comparar las series de resultados experimentales.

Los resultados fueron así comparados entre sí y con el modelo numérico para diferentes situaciones en el canal de la ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UDC.

Se realizaron diversos ensayos de validación, tanto teóricos -sin aplicación práctica real- con el objetivo de testar el modelo numérico en diferentes circunstancias de flujo como un problema real de colmatación de un vertedero de aforo. La curva de gasto de un vertedero tipo Neyrpic relaciona la altura de lámina de agua sobre el mismo con el caudal circulante permitiendo medir la primera variable, lo cual resulta mucho más sencillo. Sin embargo la relación altura-caudal teórica (o calibrada) deja de ser válida cuando el vertedero acumula sedimentos aguas arriba.

5.2.2. Instalaciones de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la UDC.

Los ensayos para la obtención de superficies bajo el agua se realizaron en el canal de experimentación hidráulica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de A Coruña, con las siguientes características:

- Longitud 15 metros, sección 50 x 50 centímetros.
- Aporte de agua por gravedad desde un depósito elevado, variable hasta 100 litros por segundo.
- Pendiente variable desde $-0,5\%$ hasta 2%
- Condición de contorno aguas abajo variable con compuerta móvil.

Esta instalación fue el lugar elegido en principio para la realización de los primeros ensayos ya que el tamaño del canal se ajusta más al rango de medida del escáner 3D Polhemus FastScan.



Figura 5.1. Canal de hidráulica de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la UDC.

Los equipos PIV y escáner 3D ya fueron descritos en los capítulos anteriores por lo que no se insistirá en ello ahora, pudiéndose ver en las imágenes siguientes fotografías en detalle de los mismos y de su uso en el citado canal.

Una de las condiciones necesarias para controlar la refracción del haz láser al introducirse en la lámina de agua es conocer su dirección en el momento de tomar

la imagen. Para ello se decidió mantener la posición perpendicular del mismo respecto al fondo del canal y desplazarlo de manera paralela a su eje. La estructura de soporte y traslación del escáner puede verse en la figura 5.2.



Figura 5.2. Estructura de soporte y traslación del escáner 3D sobre el canal.

Se dispuso asimismo una sonda de ultrasonidos para medir el calado de agua en el canal.

En la misma zona se dispuso el láser del PIV y la cámara para medir los campos de velocidades y el perfil del fondo, tal y como puede verse en la figura 5.3.



Figura 5.3. Equipo PIV situado en el canal.

5.2.3. Descripción de los ensayos y resultado de los mismos.

Para el trabajo de validación del modelo numérico se realizaron tres tipos de ensayos diferentes, todos ellos sin aporte de caudal sólido aguas arriba:

- Ensayos con caudal fijo para el estudio de la respuesta del modelo en régimen cuasiestático.
- Ensayos con caudal variable en escalones para estudiar la respuesta en régimen transitorio.
- Ensayos de colmatación de un vertedero.

En todos los casos las mediciones se espaciaron en el tiempo de manera no regular, más cercanas entre sí al inicio, donde se produce la mayor parte de la erosión, y más separadas al final cuando se está alcanzando el perfil de equilibrio.

El **primer ensayo**, con caudal fijo, fue realizado introduciendo una capa inicialmente plana de arena en la parte central del canal con unas condiciones hidrodinámicas que provocaron una erosión lenta y simétrica en el ancho del canal hasta alcanzar el perfil de equilibrio:

Capa de sedimentos 4,5 centímetros de espesor entre las secciones 4,5 a 9 metros medidas desde la entrada de agua

Condición de contorno aguas arriba: Caudal = 21.8 litros/segundo (l/s)

Condición de contorno aguas abajo: Calado = 11.5 centímetros

Pendiente: 0.052 %

Duración del ensayo: 8 horas

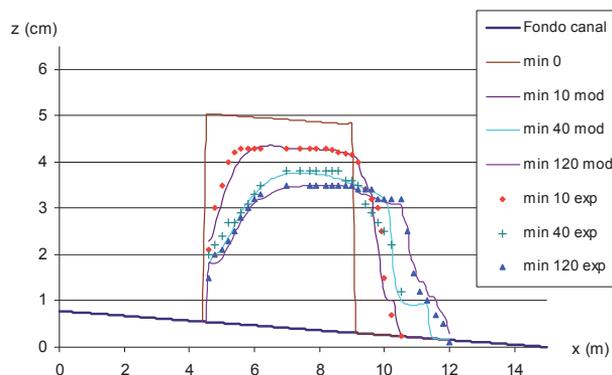


Figura 5.4. Erosión de un fondo plano en régimen cuasiestático.

En la figura 5.4. puede apreciarse cómo el sedimento es erosionado y transportado aguas abajo. Los resultados experimentales indicados en ella fueron obtenidos mediante métodos convencionales –medición por observación directa desde la pared lateral del canal de cristal- mientras que las medidas con PIV y escáner 3D fueron realizadas entre las secciones 7,63 y 8,23 metros.

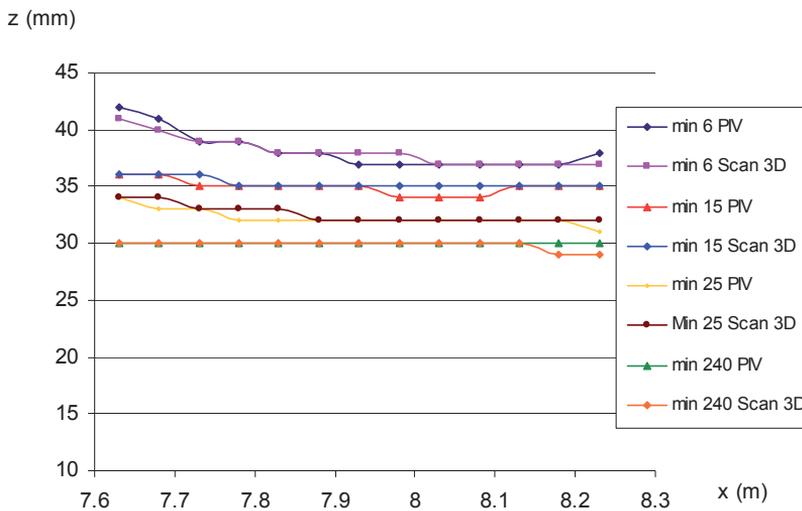


Figura 5.5. Erosión en la parte central del canal medida con el escáner 3D y el PIV.

El **segundo ensayo** se realizó partiendo de la misma situación inicial con una capa de arena en la parte central del canal y haciendo circular los siguientes caudales, incrementados en forma de escalones:

- Minutos 0 a 30: 10,4 l/s.
- Minutos 30 a 60: 19,5 l/s.
- Minutos 60 a 75: 29,6 l/s

En este caso las mediciones se realizaron únicamente con el PIV porque la inestabilidad de la lámina de agua no permitía el empleo del escáner 3D.

La erosión producida en este caso es superior tal y como corresponde a un caudal final mayor, y puede verse en las siguientes gráficas.

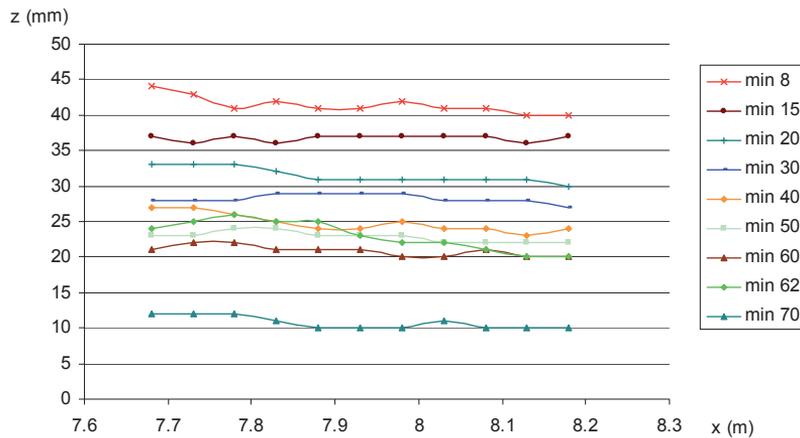


Figura 5.6. Erosión en la parte central del segundo ensayo medida con el PIV.

El **tercer ensayo** estudió las variaciones en la curva de gasto de un vertedero tipo Neyrpic. En este último se emplearon de nuevo de manera acoplada PIV y escáner 3D. Todo ello puede verse en la siguiente fotografía.



Figura 5.7. Montaje para uso conjunto y acoplado de escáner 3D y PIV.

El caudal utilizado en este caso fue de 21,8 l/s, la pendiente se mantuvo horizontal, y el espesor inicial de la capa de sedimento fue de 12 centímetros.

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.8 comparando los obtenidos con ambos instrumentos en diferentes instantes de tiempo.

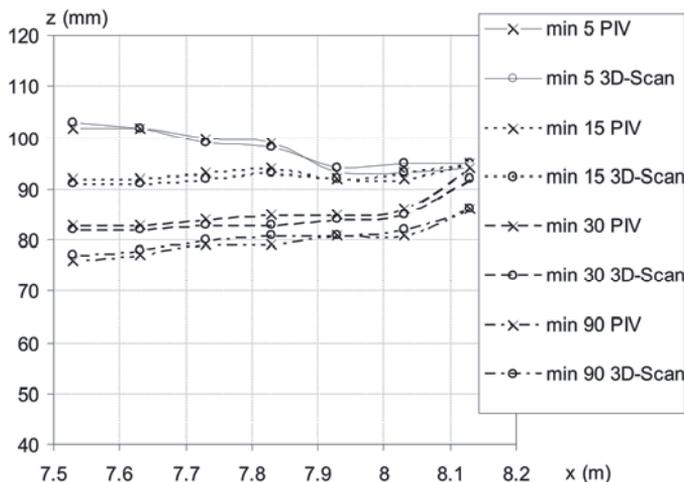


Figura 5.8. Evolución temporal de los sedimentos colmatados en un vertedero de aforo.

Los valores obtenidos reflejan la gran similitud entre los resultados registrados con ambos instrumentos, que reflejan con precisión el perfil final de equilibrio.

Además de la mayor precisión obtenida, de 0.7 mm para el escáner y 0.5 mm para el PIV de acuerdo con el análisis del capítulo 4, las medidas se han tomado de manera automatizada sin la intervención de un observador y en el centro del canal, evitando el efecto de borde que se produce en las medidas realizadas visualmente contra el lateral acristalado del canal. Otros posibles equipos como los mecánicos de contacto o de ultrasonidos habrían interferido de manera muy importante en este caso, con una lámina de agua sobre los sedimentos de escaso calado.

5.3. Análisis de daño del tronco de un dique en talud sometido a oleaje paralelo.

5.3.1. Presentación.

La fase final de construcción del Puerto de Punta Langosteira en A Coruña consiste de acuerdo con el proyecto en dos diques paralelos entre sí y perpendiculares a la

línea de costa –en adelante contradique y espigón- y para su definición definitiva la Autoridad Portuaria de A Coruña (en adelante APAC) requirió la realización de una batería de ensayos hidrodinámicos de estabilidad y funcionalidad de la estructura.

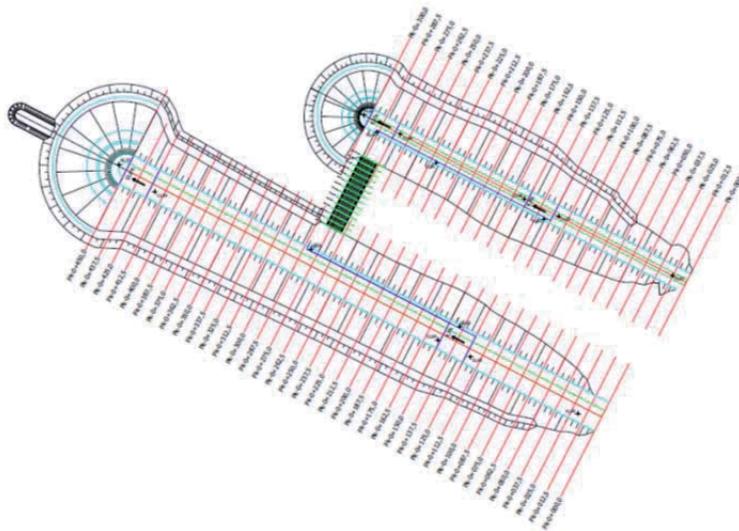


Figura 5.9. Diseño en plante del contradique y el espigón del puerto de Punta Langosteira.

A diferencia de la mayor parte de diques en los que la dirección de propagación del oleaje es perpendicular a los mismos (y por tanto las crestas de las olas son paralelas a ellos), en este caso la dirección de propagación del oleaje es paralela al eje de la estructura. Esto unido a la batimetría local con forma aproximada de plano inclinado perdiendo calado al acercarse a la costa, hace que las condiciones de oleaje sean diferentes en el morro del dique y en las secciones situadas tras el mismo, debido al asomeramiento o shoaling.

Se trata de un diseño clásico con tres capas: núcleo, filtro y manto. En el extremo del dique -la parte más expuestas al oleaje- la capa exterior está formada por bloques de hormigón, y en la parte del tronco más cercana a la costa se sustituyen estos elementos por escollera de cantera. Los objetivos fundamentales del estudio han sido los siguientes:

- Estabilidad de los elementos estructurales de los mantos, troncos y morros tanto del contradique, espigón, dique sumergido y labio de unión entre ambas estructuras.

- Estabilidad del tronco del contradique y del espigón. Obtención del punto crítico de estabilidad en el tronco, a partir del cual el manto podrá ser de escollera en vez de bloques de hormigón.

Las medidas más importantes a la hora de hacer este tipo de estudios son aquellas relacionadas con el daño sufrido bajo la acción del oleaje de diseño. En el caso del estudio de la estabilidad de los elementos de hormigón situados en el morro y las primeras secciones tras él, el método empleado habitualmente es contar el número de unidades extraídas de diferentes secciones pintadas de distintos colores.



Figura 5.10. Morro del dique formado por cubos de hormigón pintados de colores por secciones y escollera de grava a continuación.

Sin embargo en el caso del tronco del dique hecho con escollera de roca – representada en el laboratorio por grava calibrada-, este método es mejorable ya que para un estudio detallado serían necesarias muchas secciones coloreadas. Por ese motivo se buscó una alternativa en el perfilado con láser e imagen digital explicado en el capítulo 3.

A lo largo de los años 2011 y 2012 se realizaron tres estudios para tres alternativas de diseño distintas y en los dos primeros se midió el daño en las secciones de escollera de roca con este método.

5.3.2. Instalaciones de ensayo en el tanque de oleaje del CITEEC.



Figura 5.11. Modelo a escala del contradique y espigón en el tanque de oleaje.

El CITEEC dispone de un tanque de oleaje –o dársena- de 33x34 metros de superficie, 1.2 metros de altura máxima de agua y una línea completa de palas de generación capaces de producir oleaje regular y espectral.

Estas instalaciones disponibles fueron acondicionadas para las necesidades concretas del ensayo construyendo un muro a fin de conseguir 22.48 metros de ancho útil. Por tanto, las dimensiones finales de la misma, como se representa en la figura 5.12, fueron 22.48 m x 33.82 m x 1.20 m. Además, se ejecutó un relleno de hormigón aligerado para reproducir a escala la batimetría real. Por último, se dispusieron y calibraron unas playas de disipación en los contornos traseros y laterales de la dársena con el objetivo de limitar los fenómenos de reflexión.

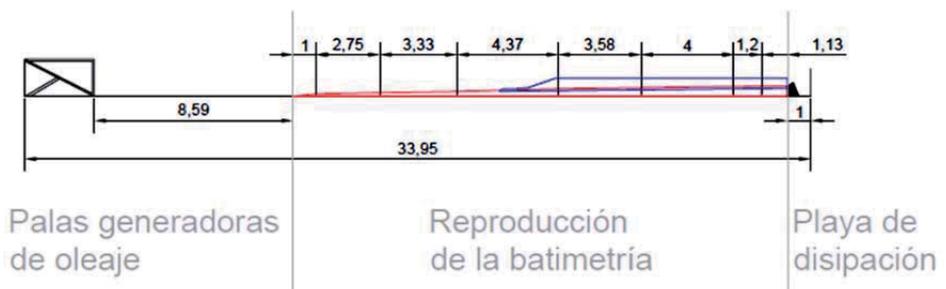


Figura 5.12. Perfil del tanque de oleaje acondicionado para el ensayo.

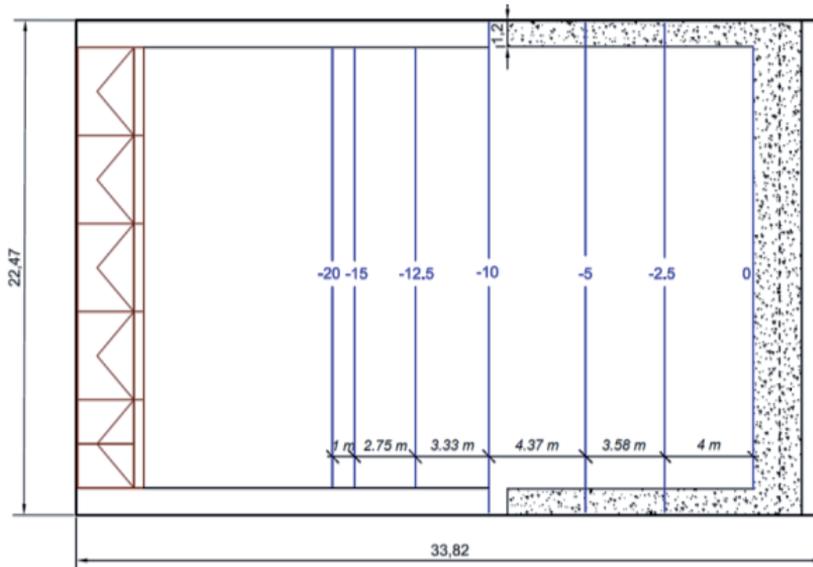


Figura 5.13. Planta del tanque de oleaje acondicionado para el ensayo.

En una primera fase, se realizó un estudio sobre los materiales idóneos a utilizar, y el uso que tendrían en el modelo. Los materiales que se emplearon en la ejecución del modelo físico respetando los criterios de semejanza, se engloban en tres grupos: material para los núcleos de contradique y espigón, material del manto en ambos casos, y bloques cúbicos de mortero. La siguiente tabla muestra las magnitudes en unidades de modelo y prototipo para cada elemento estructural del modelo.

Materiales para ejecución del modelo:

- El material de núcleo y manto se eligió entre varias muestras, y se buscó cumplir tanto el diámetro medio (d_{50}) del material prototipo como la densidad del mismo. Así pues, se escogió un garbancillo de $d_{50}=7$ mm para el núcleo.
- Teniendo en cuenta el rango de tamaños del manto de protección, se dispuso de un filtro graduado para la escollera de tamaño igual al núcleo, gravilla de 7 mm., prestándose especial atención en los ensayos al fallo por extracción de piezas del filtro, parándose los ensayos de forma inmediata en dicho caso.
- Para la escollera se optó por un morrillo de $d_{50} = 27$ mm.

- En cuanto a los bloques de hormigón de 10, 20 y 35 Tn, se probaron varias dosificaciones hasta conseguir la densidad buscada. La dosificación utilizada fue 1/1.48.

En la siguiente figura puede verse una sección tipo del dique con las citadas capas.

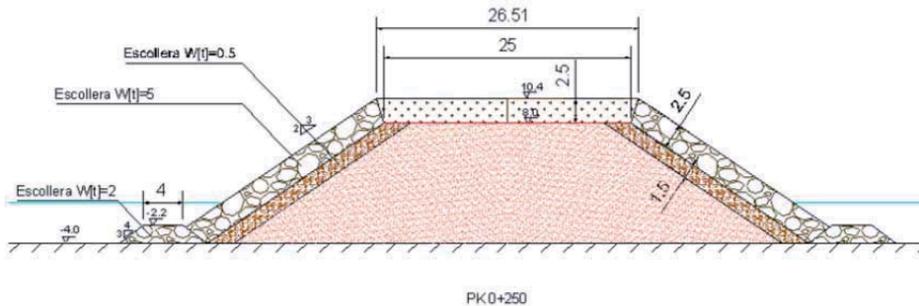


Figura 5.14. Sección transversal tipo mostrando las tres capas de construcción.

Como paso previo se realizaron unos ensayos de calibración para comprobar la correcta generación y propagación del oleaje, así como de los coeficientes de reflexión de las estructuras de absorción pasiva en los contornos laterales y de fondo.

Durante todo el desarrollo de los ensayos además de los estudios de daño la única instrumentación empleada en el laboratorio fue la de medida de oleaje, calibrada a diario.

5.3.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.

Para la realización los ensayos se definió un temporal de diseño por parte de la Autoridad Portuaria de A Coruña, consistente en tres escalones, 4, 5 y 5.85 metros de altura de ola significativa (H_s). Cada uno de estos escalones tuvo una duración de 1500 olas, generados como un oleaje irregular siguiendo el espectro Jonswap con un periodo pico (T_p) de 18 segundos. Las condiciones de marea impuestas para estudiar las distintas partes del modelo fueron:

- Bajamar, correspondiente al NMMA, para validar las secciones de la berma, labio y espigón sumergido.
- Pleamar, NMMA + 5 metros, que se usó para validar las secciones correspondientes a taludes y morros de contradique y espigón.

Por último, y una vez validada la sección, se sometió al modelo a una altura de ola de 6.75 metros con 1500 olas más para comprobar que, de haber daños, éstos no se propagasen.

Para el proyecto se estudiaron cinco alternativas diferentes hasta conseguir una solución que cumpliera los criterios de daño. No se entrará sin embargo en demasiado detalle en las mismas ya que las diferencias principales entre ellas se encuentran en el morro de bloques que no será medido con el perfilador láser. Del diseño inicial al final se fueron añadiendo más secciones de bloques tras el morro semicircular detectándose los principales problemas en las transiciones en las que piezas de un tamaño están soportadas hacia a tras por otras de tamaño menor.

En la alternativa final, al igual que en las anteriores, los daños sufridos por la armadura de escollera fueron mínimos, limitándose a pequeños movimientos. Los movimientos corresponden a recolocaciones de piezas de escollera, cuyo efecto no progresa en ningún caso hacia daños mayores. En las siguientes imágenes se puede observar el perfilado de una serie de secciones elegidas marcadas por su distancia en kilómetros (punto kilométrico, PK) a la base del dique en la costa.

Se procesaron y se compararon los perfiles de los taludes del modelo previos y posteriores al ensayo, cuantificando de este modo los desplazamientos, erosiones o acreciones presentes en los taludes.

Los perfilados de los troncos de escollera aparecen en las siguientes páginas, correspondientes a la solución final y con los puntos kilométricos que pueden verse en la figura 5.15.

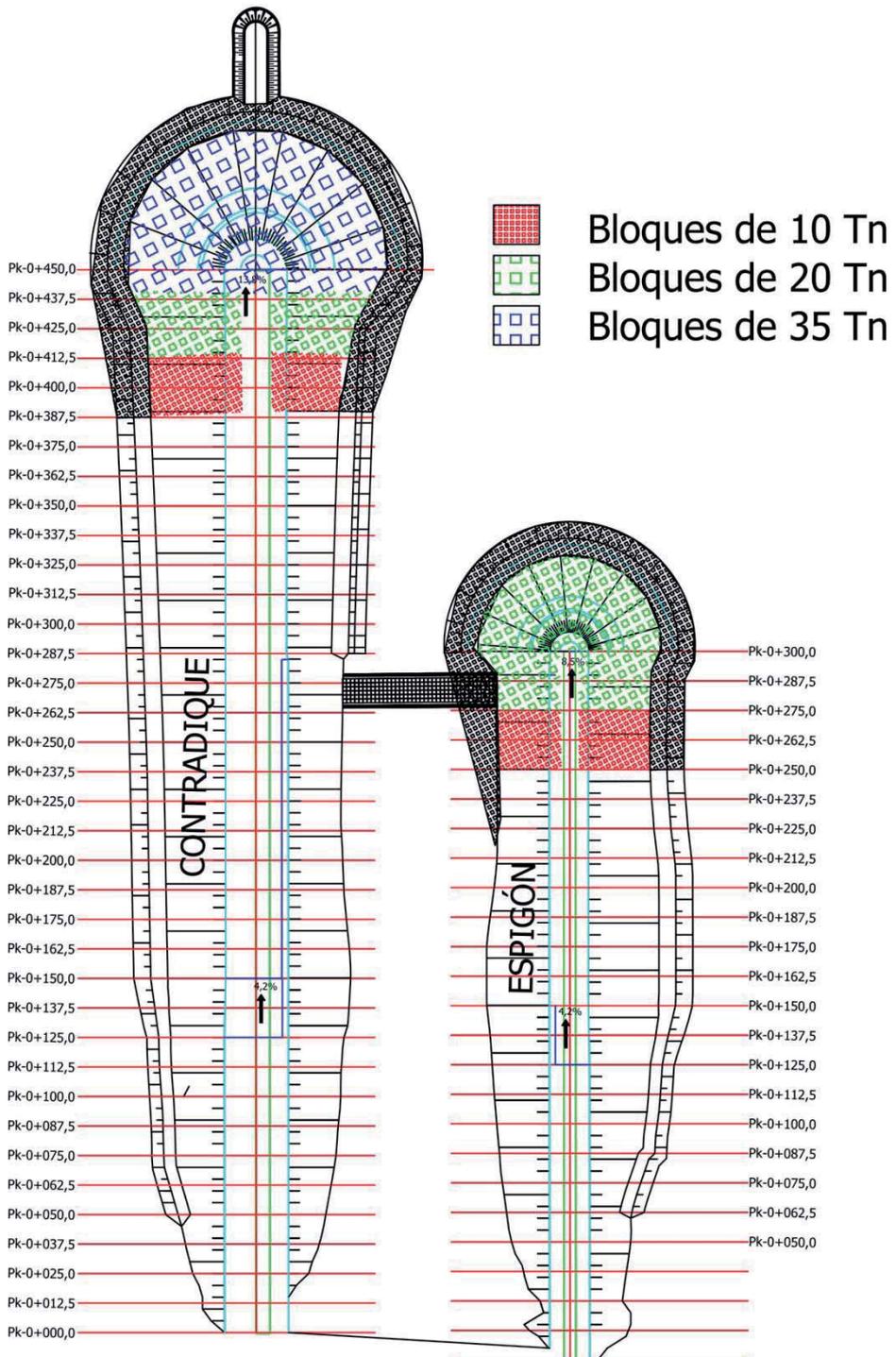


Figura 5.15. Diseño en planta del contradique y espigón mostrando los puntos kilométricos de referencia.

Talud exterior contradique:

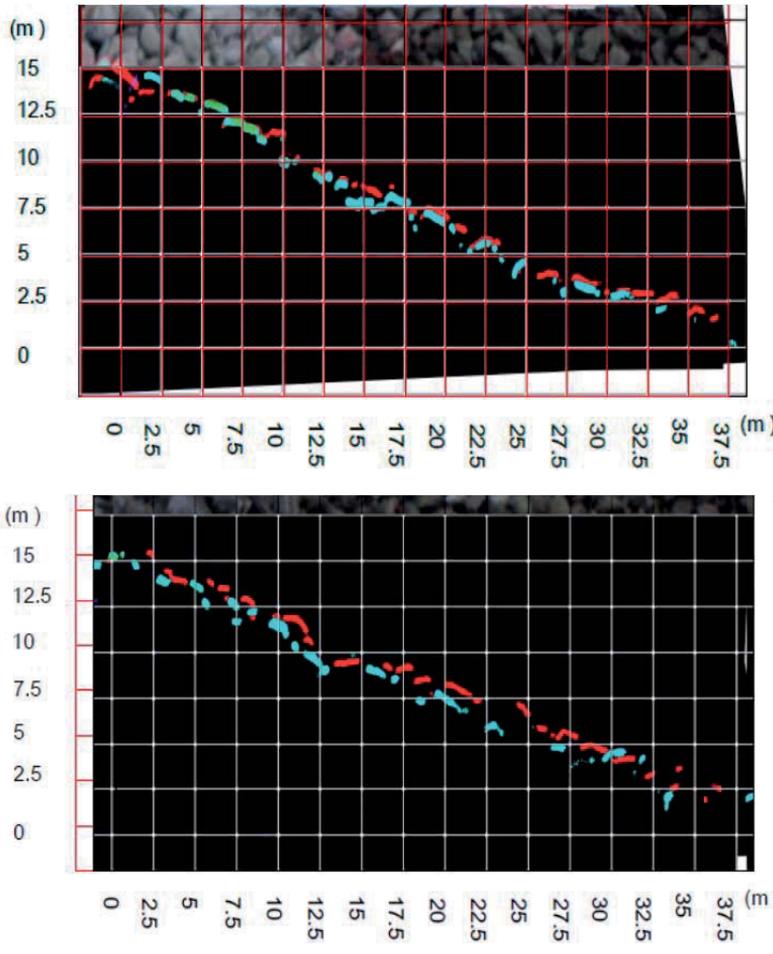


Figura 5.16. Perfiles comparados (rojo inicial-azul final), talud exterior contradique, PK's 375 y 350

El mayor daño que se alcanzó en el talud exterior fue de 1 metro, en el Pk 350 como muestra la figura 5.15. Dicho daño fue ocasionado por las piezas que se desplazaron en la transición (bloques 20 Tn a escollera), provocando pequeños desperfectos en el talud.

Tal y como puede verse en las figuras, esta técnica permite ver zonas concretas de daño estructural de manera muy sencilla y rápida. La superposición de la escala grafica permite además que éstas sean semicuantitativas. Los modelos numéricos actuales no permiten este nivel de detalle.

Talud interior contradique:

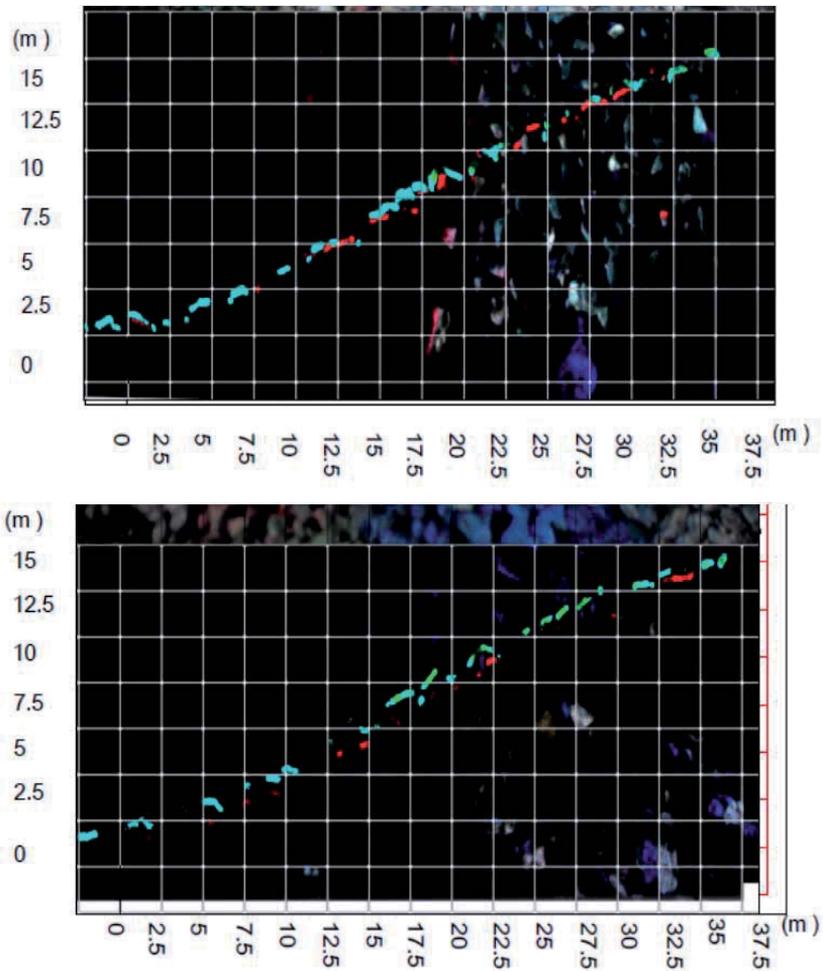


Figura 5.17. Perfiles comparados (rojo inicial-azul final) talud interior contradique, Pk's 350 y 325

En el caso del talud interior, el daño es mínimo, limitándose a pequeñas recolocaciones en el Pk 325. A pesar de tratarse de un dique perpendicular a la línea de costa, es una zona menos expuesta y no se produce rebase.

El resto de Pk's tras ser analizados, revelaron que los daños sufridos por la escollera son nulos en los 75 metros siguientes a la transición de bloques 20 Tn a escollera.

Talud interior espigón:

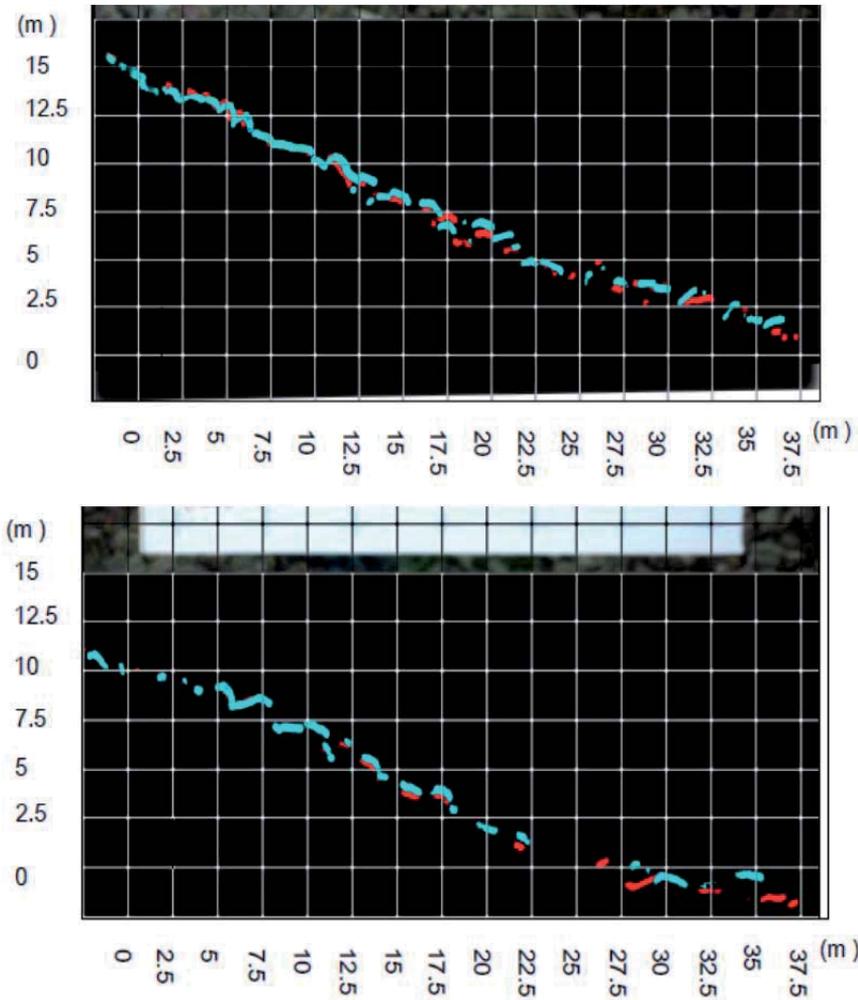


Figura 5.18. Perfiles comparados (rojo inicial-azul final) talud interior espigón, Pk's 238.5 y 225

En el talud interior del espigón no se apreció daño ninguno tras el ensayo, como puede verse en la figura 5.18.

Talud exterior espigón:

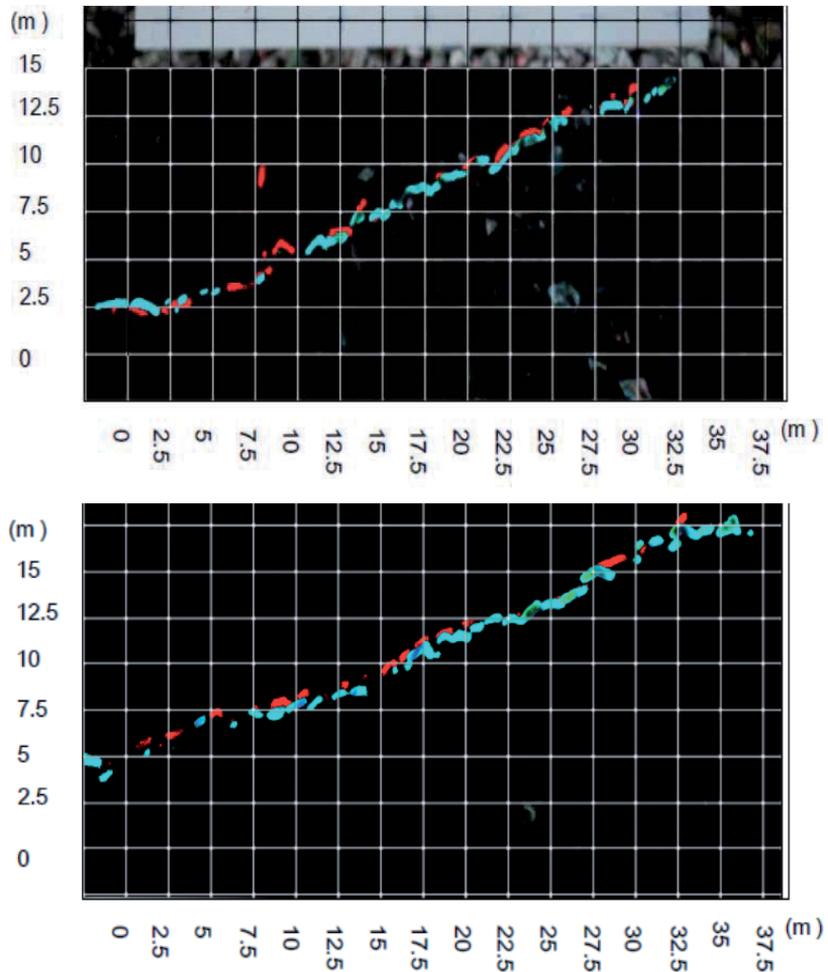


Figura 5.19. Perfiles comparados (rojo inicial-azul final) talud exterior espigón, Pk's 175 y 150

El daño producido en el talud exterior del espigón es nulo, ya que la transición se produce en un punto alejado del morro, y por lo tanto el tronco de bloques de 20 Tn disipó prácticamente toda la energía incidente.

Al igual que en el caso del contradique, en el espigón el daño en los taludes es mínimo o nulo para los Pk's más alejados del morro.

5.4. Morfodinámica de la zona de swash de una playa. Proyecto CoSSeDM.

5.4.1. Presentación.

La sección transversal de una playa adquiere su forma gracias a las olas que se desplazan desde mar adentro hacia la playa y rompen en la zona de surf, donde se producen barras de arena.

La zona de swash es la parte de la playa que se extiende entre el límite del "run-down" (nivel más bajo alcanzado por el oleaje en la playa) y el límite del remonte o "run-up" (nivel más alto alcanzado por el oleaje en la playa). En la parte alta de esta zona se forman las bermas (swashbars), acumulaciones de sedimento debidas a ese movimiento de las olas. Entre barra y berma existe una depresión llamada seno (trough) que corresponde a la parte del perfil que más se erosiona bajo la acción del oleaje. Estos conceptos se muestran gráficamente en la figura 5.20.

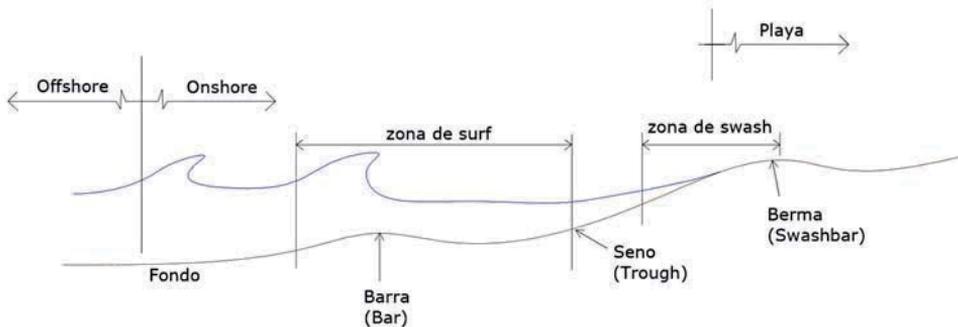


Figura 5.20. Nomenclatura de los diferentes elementos en un perfil de playa (Cáceres, 2008).

Durante los últimos 20 años, el interés de los ingenieros por la zona de swash se ha incrementado notablemente. El conocimiento de la hidrodinámica ha crecido de manera importante, pero no puede decirse lo mismo de la dinámica de los sedimentos.

A pesar de los avances más recientes, el conocimiento y las capacidades de predicción del transporte litoral son insuficientes para las necesidades de los ingenieros marítimos. No existe un modelo universal válido para la zona de swash y su morfodinámica. La falta de predicciones fiables se debe en parte a la falta de medidas fiables.

La zona de swash es especialmente difícil de medir porque el flujo en ella sucede con un calado muy escaso y en unas condiciones altamente transitorias. Además el sedimento se moviliza con muchos mecanismos de acción simultáneos.

Las técnicas de medida estaban hasta ahora afectadas por muchas restricciones, y en particular las medidas de la batimetría del fondo se tomaban después de un elevado número de grupos de ondas, haciendo imposible el estudio de evolución del perfil en corto plazo.

A esto se suma el hecho de que actualmente no hay equipos de medida capaces de observar las interacciones fluido-sedimento sobre todo el contorno. Por otro lado, la mayoría de los equipos que existen actualmente distorsionan el movimiento del agua y los flujos de sedimento, limitando su calidad y eficiencia.

El proyecto Hydralab se inició en 1997, tratando distintos campos de investigación: hidráulica, dinámica de fluidos, buques e ingeniería del hielo. Tras su primer periodo (1997-2000) se decide dar continuidad al trabajo en esos mismos campos con Hydralab-II (2000-2004), Hydralab-III (2006-2010) e Hydralab-IV(2010-2014).

El proyecto SANDS (Scaling and Analysis and New instrumentation for Dynamic bed testS) se encontraba integrado en Hydralab-III y estructurado en tres grandes bloques, el primero de ellos enfocado en el desarrollo de instrumentación, particularmente acústica y óptica.

Dentro de Hydralab-IV el proyecto CoSSedM continuó por ese camino por esa necesidad tecnológica de recursos para medir los procesos morfodinámicos en la zona de swash. Los datos básicos del proyecto son:

- **Entidad financiadora:** Comisión Europea.
- **Entidades participantes:** Universidade da Coruña, University of Queensland, University of Twente, Universidad Politécnica de Cataluña, Università Politecnica delle Marche.
- **Duración:** 2011 – 2012.
- **Equipo Investigador:**
 - o Università Politecnica delle Marche [Morphodynamic measurement and SBCs] Maurizio Brocchini, José M. Alsina, Sara Corvaro
 - o Universidad de Coruña [Video measuring of water surfaces and dry bed in the SZ] Enrique Peña, Félix Sánchez-Tembleque, Jose Anta
 - o University of Queensland [Suspended sediment transport] Tom Baldock, Ilya Othman (PhD student)

- University of Twente [Bed load sediment transport measurement]
Jan Ribberink, Rene Buijsrogge

Durante el proyecto CoSSeDM, se midieron por primera vez de manera simultánea el transporte total de sedimentos –en suspensión y de fondo- y la evolución del fondo en la zona de surf próxima (inner surf zone, ISZ) y en la zona de swash, en condiciones de oleaje erosivo y acretivo. Los experimentos se desarrollaron en el canal grande del laboratorio CIEM-UPC.

5.4.2. Equipamiento e instrumentación empleadas en el proyecto CoSSedM. Instalaciones del CIEM-UPC.

El Canal de Investigación y Experimentación Marítima es una infraestructura de investigación en el campo de la ingeniería marítima gestionada por el Laboratori d'Enginyeria Marítima (LIM) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

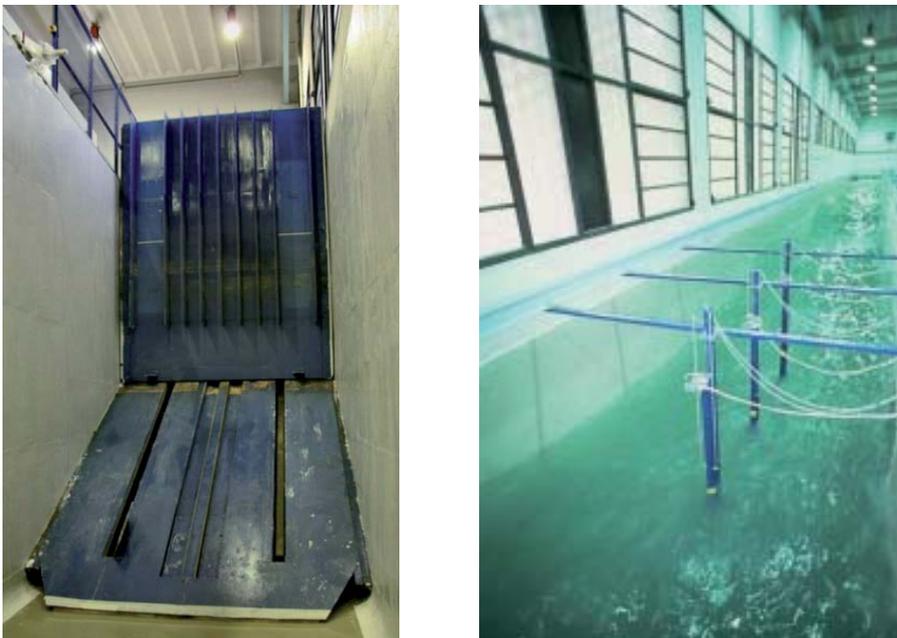


Figura 5.21. Canal de Investigación y Experimentación Marítima de la UPC.

En el año 1997 el canal CIEM fue reconocido como “Large Scale Facility” por la dirección general de investigación de la Comisión Europea (EU). Igualmente y desde el año 2006, el canal CIEM está considerado como una Instalación Científico-Técnica Singular (ICTS) por el Ministerio de Ciencia y Educación.

Sus dimensiones son de 100 metros de longitud, 3 de ancho y un máximo de 7 de profundidad. Su equipamiento con una pala en tipo cuña y un sistema de bombeo hace que sea posible generar oleaje en condiciones de aguas someras e intermedias de hasta 1,6 metros de altura y corrientes hasta $2 \text{ m}^3/\text{s}$. El generador de oleaje es capaz de producir oleaje regular y espectral con absorción activa.

Para el proyecto CoSSeDM se emplearon de manera simultánea hasta 50 instrumentos para medir la hidrodinámica, los fenómenos de transporte de sedimentos y la evolución del fondo. En la Figura 5.22 se puede ver el perfil de playa completo y un detalle del final del mismo con la posición aproximada de los instrumentos.

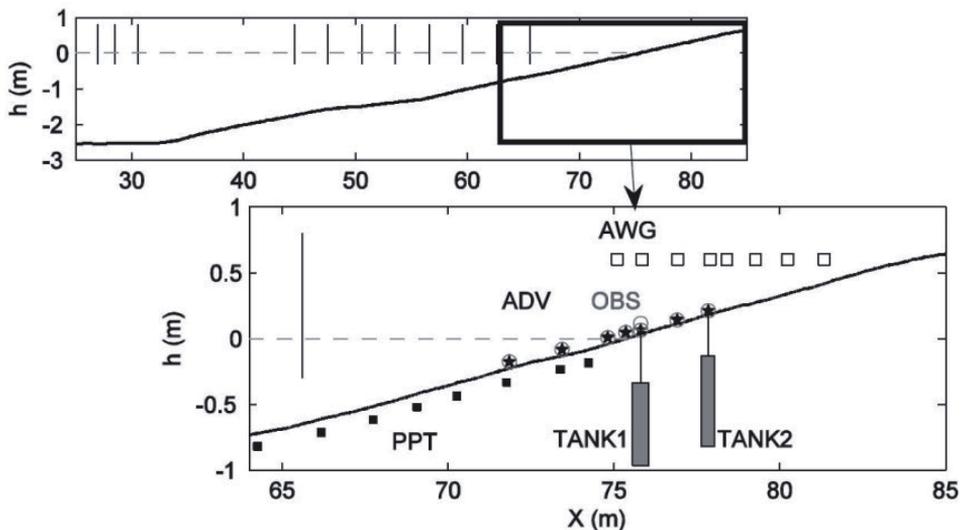


Figura 5.22. Perfil de playa y ubicación de los instrumentos de medida.

El transporte de sedimentos se midió por medio de sensores ópticos (OBS) y un tanque con electrodos de conductividad (CCM Tank) y la hidrodinámica con velocímetros doppler acústicos (ADV).

En las figuras 5.23 y 5.24 puede verse parte de la instrumentación durante las fases de preparación y realización de un ensayo.

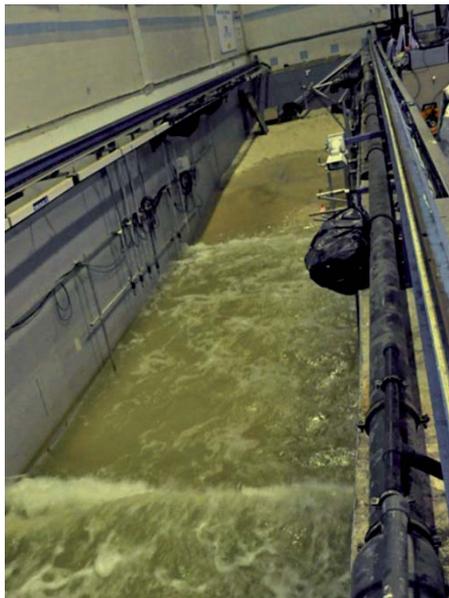


Figura 5.23. Canal del CIEM-UPC con la instrumentación de los ensayos CoSSedDM.



Figura 5.24. Pared lateral del canal con diversos sensores montados.

La evolución del fondo se midió con dos sistemas de cámaras con iluminación estructurada, uno montado por Iván Caceres (UPC) y Rosaria Musumeci (UNIVPM) y otro montado por este doctorando de acuerdo con lo explicado en el punto 3.6. La subida esperada del oleaje en la zona de swash es de 9 metros en condiciones

erosivas y de 7,5 en condiciones acretivas. El equipo desarrollado en este trabajo midió un perfil longitudinal de 4 metros en el centro de la zona de swash.

La instrumentación se completa con la medida del oleaje con sensores de conductividad, presión de poro y sensores acústicos en la zona emergida-sumergida.

5.4.3. Descripción de los ensayos y resultados de los mismos.

Puesto que el principal objetivo era obtener una descripción detallada de todos los procesos de transporte y la evolución del perfil, se diseñaron test en condiciones que pudieran ser repetidas. Se realizaron en 8 series de 125 olas representativas de un tiempo de alrededor de 4 horas. Algunos ensayos previos demostraron que en ese tiempo se alcanzaba una situación de cuasi-equilibrio en la erosión del perfil. Entre ensayo y ensayo se reacondicionaba la playa para volver a su perfil inicial plano. Los test fueron repetidos para colocar la instrumentación en diferentes zonas, en particular el tanque CCM.

Los ensayos se realizaron con oleaje bicromático produciendo condiciones erosivas y acretivas sobre una playa de arena con pendiente inicial 1:15. El uso de oleaje bicromático fue ideado para obtener un mismo espectro y contenido energético en condiciones repetibles. Las condiciones erosivas o acretivas se consiguen modificando el número de Iribarren o parámetro de surf, que relaciona la pendiente de la playa y el peralte de las olas.

La duración completa del ensayo es de 1000 olas, lo que corresponde a unas dos horas y media. Las cámaras de video empleadas permiten una grabación máxima de 30 minutos (limitación debida al tamaño de archivo) por lo que periódicamente es necesario volver a pulsar el botón de grabación y se ha aprovechado el momento para ir cambiando las tarjetas de memoria y las baterías.

La zona a medir por el equipo óptico puede verse de manera aproximada entre la posición de los dos tanques en la figura 5.22.

Código del ensayo	H1 (m)	f1 (Hz)	H2 (m)	f2 (Hz)	H/wsT	Iribarren
Condiciones erosivas						
BE1	0.29	0.303	0.25	0.237	3.089	0.429
BE1_2	0.30	0.303	0.25	0.237	3.121	0.427
BE2	0.28	0.30	0.26	0.240	2.827	0.448
BE3	0.30	0.295	0.28	0.245	3.518	0.402
BE4*	0.288	0.252	0.036	2.5		
BE4_2	0.29	0.288	0.28	0.252	3.272	0.417
Condiciones acretivas						
BA2	0.11	0.234	0.10	0.175	0.871	0.831
BA3	0.10	0.227	0.08	0.181	0.846	0.844
BA4	0.11	0.2197	0.10	0.188	0.905	0.816

Tabla 5.1. Condiciones de oleaje de los experimentos del proyecto CoSSeDM

Tal y como se describió en los apartados 3.6.4 y siguientes, se diseñó e implementó un procedimiento para extraer el perfil longitudinal de la zona de swash con una cámara de video y un láser que proyecta una línea. Las imágenes que siguen se corresponden al archivo inicial del ensayo BE1 (erosivo).

Cada grabación de 30 minutos se corresponde con una serie casi completa (120 de 125 olas) de ensayo. El algoritmo que obtiene los perfiles a partir de la grabación (en principio en unidades de imagen en píxeles, que serán después convertidas a unidades físicas en milímetros), extrae todos los perfiles cada 0,5 segundos, con el resultado que se puede ver en la siguiente figura.

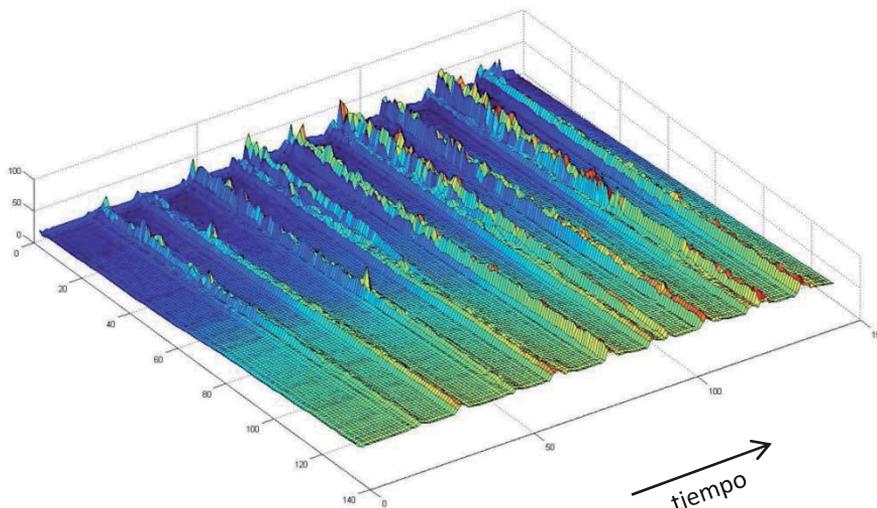


Figura 5.25. Perfiles en bruto obtenidos por el algoritmo de visión artificial para el periodo correspondiente a las 9 primeras olas (unidades píxeles).

Las crestas que pueden verse en la evolución temporal corresponden a las olas cubriendo la zona de swash. A falta de que un análisis posterior pudiese extraer datos relevantes en ellas, en este estudio se consideraron únicamente como la condición en la que no puede obtenerse un perfil válido, y con ello detectar los eventos individuales de oleaje.

La siguiente parte del algoritmo extrajo los perfiles individuales visibles cada vez que queda descubierta la zona entre ola y ola (eventos “run down”). Entre cada cresta del gráfico anterior se buscó el mejor perfil y se fue grabando su forma – todavía en píxeles- y su posición temporal, para obtener la superficie más limpia.

Los perfiles apilados ya se mostraron en la figura 3.91. La siguiente imagen muestra los mismos datos en forma de superficie y con la restricción morfodinámica explicada en el punto 4.5.3., pero sin la conversión a coordenadas reales. El eje temporal representa en unidades el periodo de oleaje, para un total de 100 olas en 24 minutos, la duración de primer video completo de ensayo.

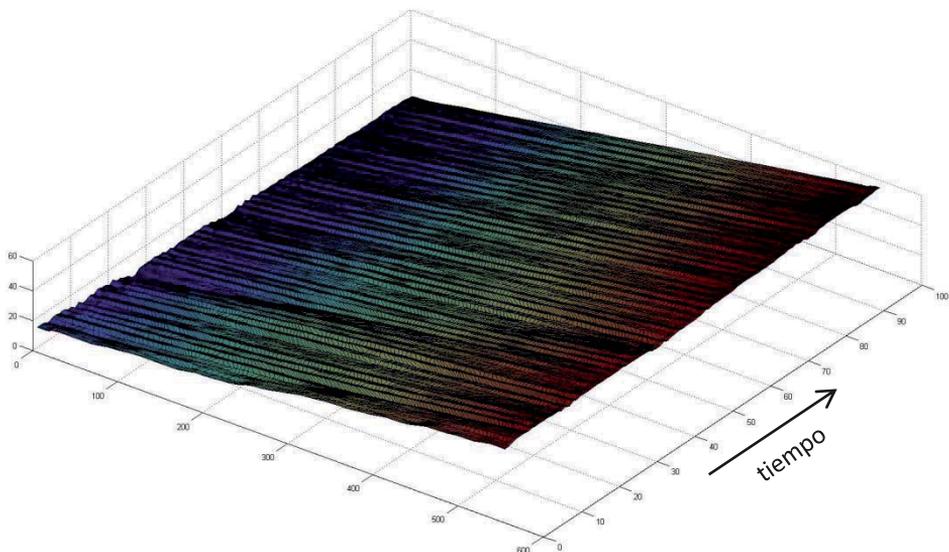


Figura 5.24. Evolución temporal del fondo en coordenadas de unidad de imagen. El eje de tiempo representa el número de olas, con un periodo medio de 15s.

Una vez convertidos los perfiles presentan una superficie similar en la forma pero que cuenta ya con unidades físicas en milímetros; el objetivo inicial del estudio era obtener información de los procesos erosivos que produce cada ola individual y esa es la información que se extrae de cada ensayo.

Extrayendo parte de los perfiles puede observarse mejor la evolución temporal del perfil de playa de manera general. Para los primeros 24 minutos de ensayo se tiene

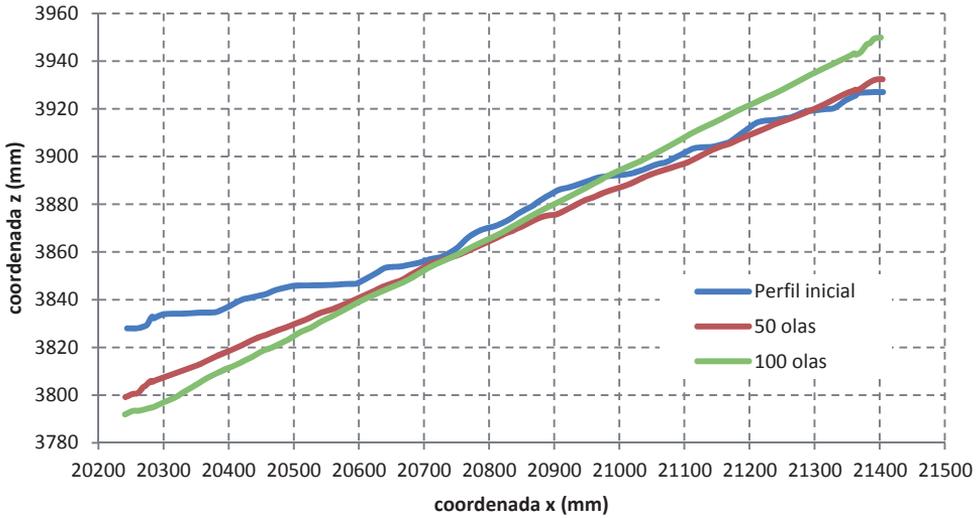


Figura 5.24. Perfil inicial de playa y evolución tras 50 y 100 olas.

Otra alternativa es observar un único punto del perfil y su evolución en el tiempo. En el gráfico se muestran los puntos inferior, intermedio y superior de la figura 5.24.

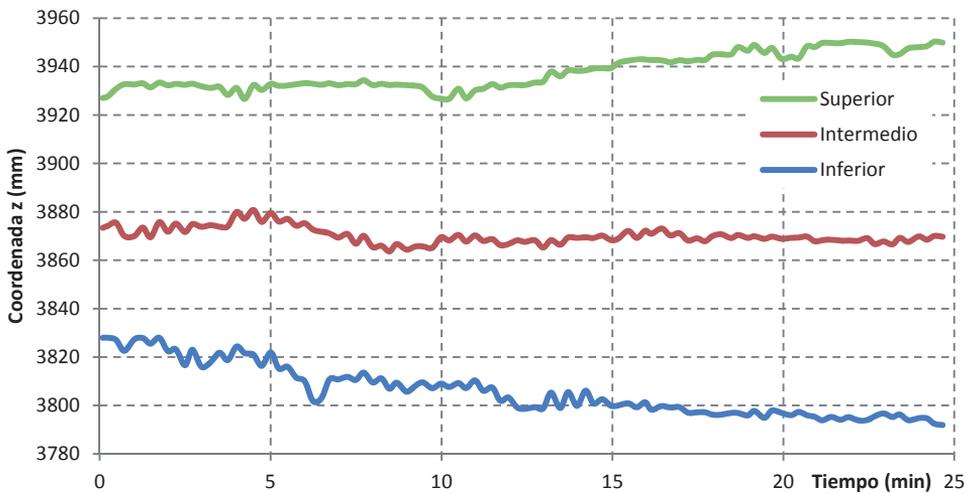


Figura 5.25. Evolución temporal de los puntos inferior, intermedio y superior del perfil.

En el punto inferior se produce una erosión de 36 milímetros, en el punto intermedio el perfil bascula, y en el punto superior se produce acreción de 23 milímetros.

En el caso del experimento presentado aquí, la grabación se completa con 5 archivos de video. La sincronización de los mismos se puede realizar a partir de los metadatos EXIF incrustados en los mismos, que indican el momento preciso del comienzo de la grabación. La sincronización con el resto de instrumentos puede hacerse de manera sencilla ya que los eventos de oleaje son fácilmente identificables también en ellos. En el proceso de cambio de batería y tarjeta pueden perderse unas pocas olas (entre 2 y 6 aproximadamente), lo que no se considera relevante para el experimento en su conjunto.

6. Potencialidades, limitaciones y futuros desarrollos.

6. Potencialidades, limitaciones y futuros desarrollos.

6.1. Potencialidades

6.2. Limitaciones.

6.3. Futuros desarrollos.

6.3.1. Obtención de superficies con un equipo de bajo coste.

6.3.2. Obtención de dos perfiles ortogonales con un equipo de bajo coste.

6.3.3. Mejoras en las limitaciones de los equipos de bajo coste.

6.3.4. Minería de datos en el proyecto CoSSeDM.

6.1. Potencialidades.

La principal potencialidad de los tres sistemas de medida que se han desarrollado, tal y como se ha insistido a lo largo del trabajo, es la posibilidad de obtener superficies de lechos de sedimentos de manera no intrusiva, completamente automatizada y en régimen no permanente. Los datos y la precisión obtenidas, detallada en el capítulo 4, hacen que se trate de herramientas con unas capacidades no vistas hasta ahora. En determinadas condiciones además esas medidas pueden tomarse bajo una lámina de agua manteniendo las condiciones no intrusivas.

Las resoluciones espaciales y temporales de medida son muy elevadas, si bien sucede algo parecido a la expresión del principio de indeterminación de Heisenberg y debe elegirse cuál de ellas es más importante.

Si la resolución temporal es la variable más importante del ensayo, la cámara empleada alcanza las 30 imágenes por segundo cuando graba video y los modelos más recientes alcanzan 60. Naturalmente existen cámaras de alta velocidad científicas capaces de elevar mucho este valor pero para estudios de erosión y sedimentación no tienen un uso claro.

Esta velocidad de adquisición tan elevada permite por un lado observar fenómenos rápidos como el run-down en una playa, y por otro desplazar el instrumento de medida de manera ortogonal al plano láser para obtener superficies en lugar de perfiles en el caso de ensayos más lentos.

Si por el contrario el ensayo es cuasi-estático y lo importante es la resolución espacial, las cámaras empleadas de 14 megapíxeles alcanzan una resolución de 1/4500 veces el campo de medida en horizontal, del orden de 1mm para un perfil de 4,5 metros, que puede mejorarse en función de las condiciones mediante la interpolación subpíxel. Con un coste más elevado, aunque sensiblemente inferior a los equipos científicos dedicados, puede ahora mismo comprarse una cámara de 36 megapíxeles y duplicar esa resolución.

También pueden adquirirse ahora mismo cámaras de video con una resolución mayor –el llamado video 4K, equivalente a 8 megapíxeles por cuadro- por un precio no muy elevado.

6.2. Limitaciones.

Los equipos estudiados a lo largo de este trabajo tienen una serie de limitaciones en su uso, muchas de ellas comunes a todos ellos y vistas en el punto 4.2. de condiciones de medida.

En el caso concreto de la adaptación de un sistema comercial, Polhemus FastScan, parte de las limitaciones de este método vienen dadas por dos circunstancias ajenas al mismo:

- La escasa potencia del láser, y su reducida penetración en aguas turbias, muy frecuentes en estos ensayos.
- Los errores derivados del sistema de posicionamiento por campos electromagnéticos.
- La excesiva curvatura de la superficie libre puede provocar distorsiones en el plano xy e incluso un fenómeno de reflexión total que haga que el láser no la atraviese.

Además el Polhemus FastScan es un sistema cerrado, tal cual se ha comprado al fabricante y sin posibilidad de modificación alguna. Puede utilizarse en unas condiciones concretas y ser muy útil en ellas, pero para superar las limitaciones debe cambiarse el equipo.

Sin embargo, la posibilidad de hacer lo mismo con el PIV o con un equipo diseñado ad-hoc a partir de láseres y cámaras comerciales hace que esta nueva vía tenga mucho más potencial, empleando para ello todo el conocimiento obtenido con el escáner Polhemus 3D. La potencia del láser puede ser mucho mayor, no tiene un sistema de posicionamiento problemático, y lo más importante, es un sistema completamente abierto en el que puede programarse la adquisición y reconstrucción de datos, la restitución de la refracción, y puede emplearse el número de cámaras que se considere oportuno. El sistema consta de un posicionador en un eje (que puede sustituirse por uno multieje) con el que desplazar el plano láser y obtener sucesivos perfiles y con ellos una superficie del mismo modo que con el Polhemus.

La limitación común y no siempre superable en todos estos sistemas es la turbidez del agua cuando se van a tomar medidas de un lecho sumergido. Es por ello que en los estudios de transporte de fondo se han utilizado sedimentos lavados para

evitar la presencia de finos. Por ese mismo motivo el canal del CIEM dispone de un sistema de filtrado.

Otra limitación en el empleo de cámaras de video convencionales es la duración máxima de las grabaciones, de entre 20 y 30 minutos.

6.3. Futuros desarrollos.

6.3.1. Obtención de superficies bajo el agua con un equipo de bajo coste.

Una vez demostrada la posibilidad de obtener una imagen deshaciendo la transformación de la refracción, y por otro lado la de tomar este tipo de medidas con un equipo de bajo coste, una línea natural de continuación de este trabajo es la combinación de ambos.

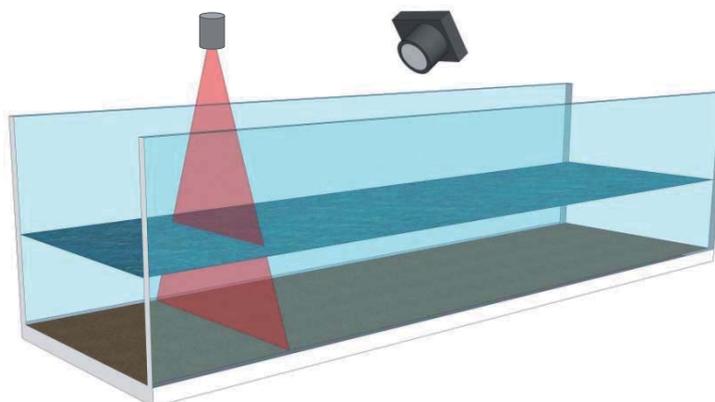


Figura 6.1. Cámara y láser convencionales para su uso como escáner 3D.

Montando el láser y la cámara en un bastidor se podrían desplazar de manera similar al escáner 3D y tomarse medidas completas de una superficie en lugar de perfiles.

En este montaje, en lugar de hacer el desarrollo teórico y la calibración de la refracción visto en los puntos 3.2 y 3.3, y que eran necesarios por tratarse de un sistema cerrado puede recurrirse a una opción más sencilla: realizando un mapeado con un patrón de cruces, que para tratar adecuadamente el curvado de la superficie deberá hacerse con funciones de orden superior a bilineales.

El láser empleado para medir en el proyecto CoSSeDM, capaz de iluminar una línea de 3 a 4 metros, dará 10 veces más luminancia en un área del ancho de los canales de experimentación típicos en 30 a 40 centímetros. Este hecho hace que potencialmente se pueda trabajar con niveles de turbidez algo más elevados, lo que constituía una de las limitaciones básicas de adaptar un sistema comercial.

La otra limitación intrínseca al sistema Polhemus 3D, la interferencia del sistema de posicionamiento con campos electromagnéticos, queda también eliminada al no emplearse el mismo. En su lugar es únicamente necesario un sistema de traslación con registro preciso de la posición a lo largo del canal, o bien una serie de marcas fijas visibles en el fondo del mismo.

6.3.2. Obtención de dos perfiles ortogonales con un equipo de bajo coste.

Además del láser de albañil que proyecta un plano de luz, con el mismo coste y del mismo fabricante está disponible un modelo similar que proyecta dos planos de luz ortogonales. En muchas ocasiones, como es el caso de la erosión producida aguas abajo de una pila de puente, en lugar de obtener una superficie completa de la socavación producida, puede ser suficiente obtener dos perfiles transversales para con ellos hacer una estimación del volumen de material erosionado. Ello requiere una calibración más cuidadosa en dos planos con un patrón, pero sin embargo evita la complejidad del uso de un equipo que desplace cámaras y láseres, tal y como se trató en el punto anterior.

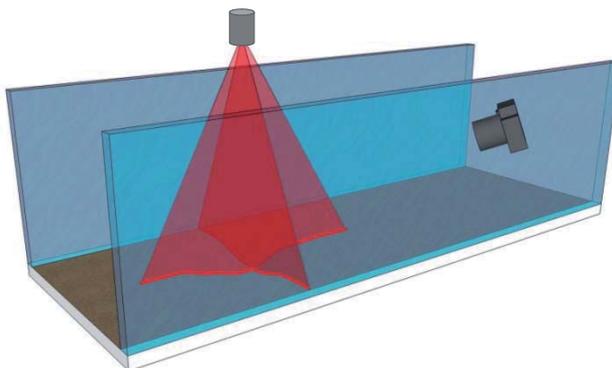


Figura 6.2. Equipo láser con dos planos ortogonales para la medida en 3D.

Colocando la cámara en una bisectriz de ambos planos puede tomarse la medida sin la necesidad de una segunda imagen con otra perspectiva.

6.3.3. Mejoras en las limitaciones de los equipos de bajo coste.

De los puntos anteriores de potencialidades y limitaciones de los sistemas basados en imagen y luz estructurada pueden deducirse dos mejoras claras a los sistemas empleados.

- Empleo de un láser de mayor potencia.
- Empleo de una cámara de mayor resolución.

El empleo de un láser de mayor potencia lleva asociado necesariamente la adopción de protocolos de seguridad más estrictos, pero por otro lado permite el uso de valores más bajos de sensibilidad ISO, elimina en parte la necesidad de controlar la iluminación del laboratorio y permite la iluminación de áreas mayores.

El Grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (GEAMA-UDC) tiene además otras líneas de trabajo en las que se emplea iluminación láser como es el estudio de emisarios submarinos –de depuradoras y de desaladoras-, y el tránsito de diferentes especies piscícolas por escalas de remonte de estructuras, por lo que se ha propuesto la adquisición de un láser continuo, económico y de mayor potencia.

De nuevo en lugar de recurrir a un equipo específicamente científico se ha encontrado una solución comercial adaptable, en este caso una mira láser de color verde (532nm) de clase 3B empleada para rifles de caza. El haz cilíndrico generado puede transformarse en un plano mediante una lente cilíndrica como la empleada por el equipo PIV.



Figura 6.3. Mira láser de 20mW de potencia y color verde.

El equipo mostrado en la imagen, de 20mW, puede adquirirse por un precio relativamente bajo.

La otra mejora posible en el equipo es el uso de una cámara de video con mayor resolución y menor compresión de datos en el formato de archivo MPG. La aparición reciente de modelos de cámaras compactas con objetivos intercambiables capaces de grabar video con mucha mayor calidad hace esto posible manteniendo el planteamiento original de utilizar un equipo de bajo coste, sobre todo en comparación con un equipo científico específico.

En el momento presente probablemente los modelos que más se acercan a este planteamiento están en la gama Lumix GH de Panasonic, capaces de grabar video en alta resolución 1920x1080 píxeles a 60 frames por segundo (modelo GH3) y hasta 3840 x 2160 a 30 (video 4K, modelo GH4). Para hacer una estimación de la compresión de imagen, la salida de este modelo GH3 medida en ancho de banda es de hasta 72 Mbps (megabits por segundo) por los 9 Mbps de la Sony NEX-3.



Figura 6.4. Gama de cámaras Panasonic Lumix GH

6.3.4. Minería de datos en el proyecto CoSSeDM.

Con un simple análisis de la cantidad de datos de los vídeos grabados durante los experimentos del proyecto CoSSeDM, lo primero que resulta cuando menos curioso es que de un archivo de video de 2GB, el resultado final procesado que contiene los perfiles de erosión es de 800KB, unas dos mil veces más pequeño.

Dejando de lado el hecho de que no toda la imagen tiene información relevante pero debe ser registrada de igual modo por el equipo empleado, parece evidente

que puede hacerse un análisis más detallado de los vídeos para extraer más información en el proceso que tradicionalmente se denomina minería de datos.

Una de las posibles medidas que ya se ha observado que pueden estudiarse es la extensión -en el tiempo y en el espacio- de los eventos run-up.

Además de las imágenes en las que se puede ver el perfil completo (run-down), y aquellas en las que no se ve nada, existen otras en las que puede verse una parte del perfil de manera clara cuando la zona de arena está parcialmente cubierta como en la figura 6.5.



Figura 6.5. Fotograma extraído de la grabación de video con la zona de swash parcialmente cubierta.

Para ello en lugar de comparar la diferencia entre dos perfiles consecutivos puede estudiarse la diferencia que existe con el último perfil completo dado por bueno para ver en qué partes coinciden y en cuales están cubiertos por las olas y no son visibles. De este análisis podría obtenerse información del run-up en cuanto a su extensión y velocidad, y por tanto su energía.

La otra información que podría estudiarse es la forma de la curva RMS en las zonas de run-down, avanzando en el análisis descrito en el apartado 3.6.6. En algunos casos el intervalo temporal del run-down refleja una curva plana correspondiente a un perfil descubierto completamente, y en otros la bajada del RMS es más gradual como puede verse en la figura 6.6.

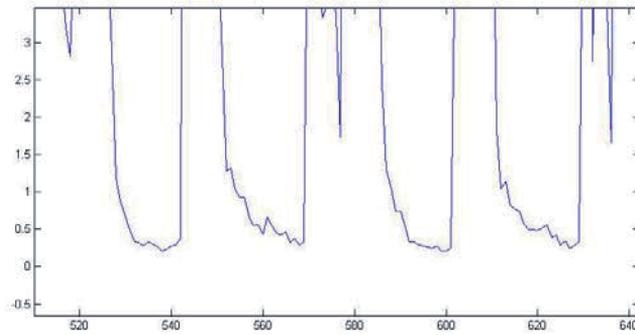


Figura 6.6. Detalle del gráfico de RMS con diferentes formas de los eventos de run-down.

Esta diferencia podría estar relacionada con la retirada más lenta de la ola formando una capa de sedimentos móviles –sheet flow layer- denominado en ocasiones fenómeno de wash-down, y durante el cual se produce una erosión mayor.

Bibliografía

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.

Adrian RJ (2005) Twenty years of particle image velocimetry. *Experiment in Fluids*, 39: 159-169.

Adrian RJ, Christensen KT, Liu Z-C (2000) Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. *Experiments in Fluids* 29: 275-290

Adduce C, La Rocca M, Mele P (2004) Local scour downstream of grade control structures, *Hydraulics of Dams and River Structures Conference Proceedings*, ISBN: 90-5809-632-7.

AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación (1996). Norma UNE-EN 60825-1:1996: Seguridad de los productos laser. Parte 1: Clasificación del equipo, requisitos y guía de seguridad.

AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación (2000). Norma UNE-EN 60825-4:2000: Seguridad de los productos laser. Parte 4: Sistemas de protección frente a la radiación laser.

Afanasyev YD, Demirov EK (2005) A variational filtration and interpolation technique for PIV employing fluid dynamical constraints. *Experiments in fluids* 39: 828-835

Ahmed SM, Sato S (2001) Investigation of bottom boundary layer dynamics of movable bed by using enhanced PIV technique. *Coastal Engineering journal*, Vol. 43(4): 239-258

Anta J, Peña E, Sánchez-Tembleque F, Puertas J (2007) An experimental study of a two-layer flow above a submarine sill using PIV. 32nd Congress of the International Association of Hydraulic Engineering and Research. Venecia julio de 2007. ISBN 88-89405-06-6

Baglio S, Faraci C, Foti E (1999) Structured light approach for measuring sea ripple characteristics. *OCEANS '98 Conference Proceedings vol.1*: 449-453.

Baglio S, Faraci C, Foti E, Musumeci R (2001) Analysis of small scale bedforms with 2D and 3D image acquisition techniques. *Oceans 2001 IEEE International Conference*.

Baglio S, Faraci C, Foti E, Musumeci R (2001) Measurements of the 3D scour process around a pile in an oscillating flow through a stereo vision approach. *Measurement* 30 (2): 145–160.

Bagnold RA (1963) *Mechanics of marine sedimentation*. M.N. Hill (Ed.), *Sea—Ideas and Observations*, Wiley, New York (1963), pp. 507–528

Balachandar R, Kells JA (1998) Instantaneous water surface and bed scour profiles using video image analysis. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1998, 25(4): 662-667

Ballio F, Raadice A (2003) A non-touch sensor for local scour measurements. *Journal of Hydraulic Research* 41:105-108.

Barnes MP, O'Donoghue T, Alsina JM, Baldock TE (2009) Direct bed shear stress measurements in bore-driven swash. *Coastal Engineering* 56: 853-867

Battisto GM, Friedrichs CT, Miller HC and Resio DT (1999) Response of OBS to mixed grain size suspensions during Sandy Duck'97. *Coastal Sediment Conference 99*, ASCE, New York. pp. 297-312.

Beacha RA, Sternberg RW, Johnsonb R (1992) A fiber optic sensor for monitoring suspended sediment. *Marine Geology Volume* 103(1–3): 513–520.

Besl PJ (1998) Active, optical range imaging sensors. *Machine Vision and Applications* 1988, Volume 1(2): 127-152.

Best J, Ashworth P (1994) A high-resolution ultrasonic bed profiler for use in laboratory flumes. *Journal of Sedimentary Research* 24: 279–288

Bobroff N (1986) Position Measurement with a resolution and noise-limited instrument. *Review of Scientific Instruments* 57: 1152-1157

Bolinder J (1999) On the accuracy of a digital particle image velocimetry system. Technical report Lund Institute of Technology; June 1999

Briechle K, Hanebeck UD (2001) Template matching using fast normalized cross correlation. Proc. SPIE 4387, Optical Pattern Recognition XII, 95.

Caceres I, Grüne J, Van Rijn L, Sánchez-Arcilla A, Ahmari A, Ribberink J (2008) Mobile-bed tests. The SANDS project. Proceedings of th 31st Conference on Coastal Engineering, San Diego, California. Ed World Scientific. pp 2622-2632.

Chen Y, Medioni G (1991) Object modeling by registration of multiple range images. Proceedings. IEEE International Conference on Robotics and Automation Volume 3, pp 2724-2729

Chanson H (1999) The Hydraulics of Open Channel Flow : An Introduction. Butterworth-Heinemann, Oxford, UK. ISBN: 0 340 74067 1.

Chanson H (2009) Development of the Bélanger Equation and Backwater Equation by Jean-Baptiste Bélanger (1828). Journal of Hydraulic Engineering, 135(3): 159-163

Curless B (1995) Better optical triangulation through spacetime analysis. Computer Vision, 1995. Proceedings., Fifth International Conference on.

Curless B (2000) From Range Scans to 3D Models. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 33, Issue 4, pp 38-41.

Delft Hydraulics. Video based measurement techniques at WL. PDF document at Delft Web Page. <http://www.wldelft.nl/proj/pdf/3uk00208.scherm.pdf>

Downing JP, Sternberg RW and Lister CRB (1981) New Instrument for the Investigation of Sediment Suspension Processes in the Shallow Marine Environment. Marine Geology 42: 19-34.

Downing JP (2006) Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. Continental Shelf Research 26(17–18): 2299–2318.

Emery WJ, Thomson RE (2001), Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Elsevier B.V. ISBN: 978-0-444-50756-3

- Erikson LH, Hanson H** (2005) A method to extract wave tank data using video imagery and its comparison to conventional data collection techniques. *Computers & Geosciences*. Volume 31(3): 371–384.
- Fang T, Piegl LA** (1995). Delaunay triangulation in three dimensions. *IEEE Comput Graphics Appl* 15(5): 62–69.
- Faraci C, Foti E** (2001) Evolution of small scale regular patterns generated by waves propagating over a sandy bottom. *Physics of Fluids* 13 (6): 1624–1634.
- Faraci C, Foti E** (2002) Geometry, migration and evolution of small-scale bedforms generated by regular and irregular waves. *Coastal Engineering* 47: 35–52.
- Faraci C, Foti E, Baglio S** (2000) Measurements of sandy bed scour processes in an oscillating flow by using structured light. *Measurements* 28(3): 159–174.
- Faugueras O** (1993) Three dimensional computer vision: a geometric viewpoint. Ed. The MIT press. Cambridge. ISBN: 9780262061582.
- Fisher R** (2014) CVonline: The Evolving, Distributed, Non-Proprietary, On-Line Compendium of Computer Vision.
<http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/CVentry.htm>
- Foote M, Horn D** (1999) Video measurement of swash zone hydrodynamics. *Geomorphology* 29(1): 59-76.
- Foti E, Cáceres I, Marini A, Musumeci RE, Sánchez-Arcilla A** (2011) Experimental investigations of the bed evolution in wave flumes: Performance of 2D and 3D optical systems. *Coastal Engineering* 58(7): 606-622.
- Freeman M** (2010) Guía completa de luz e iluminación. Ed. Blume, ISBN 9788480768818.
- Friedrich H, Melville BW, Coleman SE, Nikora V, Clunie TM** (2005) Three-dimensional measurement of laboratory Submerged bed forms using moving probes. XXXI IAHR CONGRESS.

Frostick LE, McLelland SJ, Mercer TG (2011) Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network. Series: IAHR Design Manual. Ed. CRC Pres. ISBN: 9780415609128,

García M (1999) Sedimentation and Erosion Hydraulics, in Hydraulic Design Handbook. Edited by Larry Mays, McGraw-Hill Inc. ISBN 978007411524.

Gonzalez R, Woods R, Eddins S (2009) Digital Image Processing Using Matlab. Gatesman Publishing, US. ISBN 978-0-9820854-0-0

Grant I (1997) Particle Image Velocimetry: a review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers part C 211: 55-76.

Hancock G, Willgoose G (2001) The production of digital elevation models for experimental model landscapes. Earth Surface Processes and Landform 26: 475–490.

Hendriks IE, van Duren L, Herman P (2004) Flow dependent processes in settlement of intertidal bivalve larvae. Ch. 6: Measurements of near-bed flow under different turbulence levels. Ed Ponsen en Looijen, Wageningen

Hoitink AJF, Hoekstra P (2005) Observations of suspended sediment from ADCP and OBS measured in a mud-dominated environment. Coastal Engineering 52: 103-118.

Hughes M, Masselink G, Hanslow D, Mitchell D (1997) Towards a better understanding of swash zone sediment transport. Proceedings Coastal Dynamics. ASCE, pp. 804–823.

Hughes SA (1993). Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Advanced Series on Ocean Engineering-Volume 7, World Scientific, Singapore. ISBN: 9789810215415.

Hunter F, Biver S, Fuqua P (2011) Light Science and Magic: An Introduction to Photographic Lighting. Ed Elsevier. ISBN: 978-0240812250

Jähne B (1997) Practical Handbook on Image Processing for Scientific Applications. CRC Press. Boca Ratón, New York. ISBN: 9780849389061.

Julien PY (1995) *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. ISBN: 9780521537377.

Lin YB, Chen JC, Chang KC, Chern JC, Lai JS (2005) Real-time monitoring of local scour by using fiber Bragg grating sensors. *Smart Materials and Structures* Volume 14(4): 664-670.

Lodha, SK and Franke R (1999) *Scattered Data Techniques for Surfaces. Proceedings of Dagstuhl Conference on Scientific Visualization*, IEEE Computer Society Press. pp 181-222. ISBN: 0769505058

Lohrmann R, Cabrera R, Kraus N (1994), "Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) for laboratory use". *Proceedings from Symposium and fundamentals in Hydraulic measurement and Experimentation*, ASCE, pp 351-365.

Lynch DK, Livingston W (2001) *Color and light in nature*. Cambridge: Editorial Cambridge University Press. ISBN: 9780521775045.

Martin Vide JP (2007) *Ingeniería de ríos*. Ediciones UPC (Barcelona). Colección Politecnos. ISBN 9788483015636

Masselink G, Puleo JA (2006) Swash-zone morphodynamics. *Continental Shelf Research* 26: 661–680.

Mateos C (2000) La modelización física en obras hidráulicas. *Revista Ingeniería del agua* 7(1): 55-70.

Messer M (2005) *Pulsed Ultrasonic Doppler Velocimetry for Measurement of Velocity Profiles in Small Channels and Capillaries*. PhD Thesis. Georgia Institute of Technology.

McCallum B, Nixon M, Price B, Fright R (1998) A Feasibility Study of Hand-held Laser Surface Scanning. *Proceedings Image and Vision Computing NZ*. pp 103-108.

McCallum B, Nixon M, Price B, Fright R (1998). Handheld laser scanning in practice. *Proceedings Image and Vision Computing NZ*. pp 17–22.

Munro RJ, Dalziel SB (2005) Attenuation technique for measuring sediment displacement levels. *Experiments in Fluids* 39: 600-611.

Nielsen P (1992) Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advances Series on Ocean Engineering*, vol. 4, World Scientific Publishing, Singapore. ISBN: 9789810204723.

Nishimura T, Inaba S, Hishida K, Maeda M (2000) Measurements of flow around inclined jets by stereoscopic PIV. In: *Proceedings of 10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Lisbon. 2000.

Nixon M, McCallum B, Fright R, Price B (1998) The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 7(2): 204–218.

Nobach H, Damaschke N, Tropea C (1995) High-precision sub-pixel interpolation in particle image velocimetry image processing. *Experiments in Fluids* 39: 299–304.

O'Donoghue T, Doucette JS, van der Werf JJ, Ribberink JS (2006) The dimensions of sand ripples in full-scale oscillatory flows. *Coastal Engineering* 53: 997–1012.

O'Shea DC, Callen WR, Rhodes WT (1978) *Introduction to lasers and their applications*. Addison Wesley, 1977 (reimp. 1978). ISBN: 0201055090.

Park SY (2003) *Stereo Vision and Range Image Techniques for Generating 3D Computer Models of Real Objects*, Ph.D. Dissertation Dept. of Electrical and Computer Engineering, SUNY at Stony Brook, Sept. May 2003

Peña E (2002a) *Estudio numérico y experimental del transporte de sedimentos en cauces aluviales*. Tesis Doctoral. *Universidade da Coruña*.

Peña E, Fe J, Sánchez-Tembleque F, Puertas J (2002b) A 2D numerical model using finite volume method for sediment transport in rivers. *Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics*. Louvain la-Neuve, Belgium, pp 693–698.

Peña E, Sánchez-Tembleque F, Pena L, Puertas J (2007) Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-Scanner. *Optics and Laser Technology*. 39: 481-489

Polhemus Incorporated (2002). 3Space FastScan. Handheld laser scanner user's manual, 1st ed. Vermont: Polhemus.

Pos JD, Adams LP, Kilner FA (1988) Synoptic wave height and pattern measurements in laboratory wave basins using close-range photogrammetry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54 (12): 1749–1756.

Puleo JA, Faries J, Davidson M, Hicks B (2010) A Conductivity Sensor for Nearbed Sediment Concentration Profiling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 27: 397–408.

Radice A, Malavasi S, Ballio F (2006) "Solid transport measurements through image processing." *Experiments in Fluids* 41: 721-734.

Raffel M, Willert C y Kompenhans J. (1998) *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide* Ed. Springer. ISBN: 9783540723080.

Ribberink JS, Al-Salemb AA (1995) Sheet flow and suspension of sand in oscillatory boundary layers. *Coastal Engineering* 25: 205–225.

Richards KS, Robert A (1986). Laboratory experiments with the hr multipurpose profile follower on a rippled sand bed. Department of Geography Working Paper, 22, University of Cambridge.

Ridd P, Thomas S, Harradence J, Fox D, Bunt J, Renagi O, Jago C (2001) Measurement of sediment deposition rates using an optical backscatter sensor. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 52: 155-163

Rooij F de, Dalziel SB, Linden PF (1999) Electrical measurement of sediment layer thickness under suspension flows. *Experiments in Fluids* 26: 470–474

Sambrook GH, Nicholas AP (2005) Effect on flow structure of sand deposition on a gravel bed: Results from a two-dimensional flume experiment. *Water Resources Research* Vol. 41(10): 1-12.

Savchenko VV, Pasko AA, Okunev OG, Kunii TL (1995) Function representation of solids reconstructed from scattered surface points and contours. Proceedings of Computer Graphics Forum 14(4): 181–188.

Scheimpflug T (1904) Improved Method and Apparatus for the Systematic Alteration or Distortion of Plane Pictures and Images by Means of Lenses and Mirrors for Photography and for other purposes. GB Patent No. 1196. Filed 16 January 1904, and issued 12 May 1904.

Shepherd IE (1996) The measurement of bed form shapes in hydraulic models. Coastal Engineering. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida. Ed ASCE. New York, pp 3169-3182.

Soloff SM, Adrian RJ, Liu ZC (1997) Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. Measurement Science and Technology Volume 8(12): 1441-1454.

Soulsby R (2008) Guidelines for physical modelling of sediment dynamics. HYDRALAB-III. Documento PDF disponible en la web institucional de Hydralab.

Sumer BM, Fredsøe J (2001) Wave scour around a large vertical circular cylinder. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 127(3): 125–134.

Thorne PD, Hanes DM (2002) A review of acoustic measurement of small-scale sediment processes. Continental Shelf Research 22: 603-632

Thorne PD, Vincent CE, Hardcastle PJ, Rehman S, and Pearson N (1991) Measuring suspended sediment concentrations using acoustic backscatter devices. Marine Geology 98: 7-16.

Trucco E, Verri A (1998) Introductory techniques for 3-D computer vision. Prentice Hall. ISBN: 9780132611084.

Tsai RY (1987) A versatile camera calibration technique for high accuracy machine metrology using Off the Shelf TV Cameras and lenses. IEEE Robotics and Automation Magazine RA-3(4): 323–344.

Valeport Ltd (2011) Model 801 Electromagnetic Flow Meter Datasheet. www.valeport.co.uk.

Van der Werf JJ, Ribberink JA, O'Donoghue T, Doucette JS (2006) Modelling and measurement of sand transport processes over full-scale ripples in oscillatory flow. *Coastal Engineering* 53: 657–673.

Van Rijn LC (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, The Netherlands.

Van Rijn LC (2007) *Manual Sediment Transport Measurements in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, The Netherlands.

Vanoni, VA (2006) *Sedimentation Engineering*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54. ISBN: 9780784408230.

Westerweel J (2000). Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 29(1): supplement s3-s12.

Willemetz LC (1987) Instantaneous Doppler frequency measurement and implementation in a multigate flowmeter. 6th European Congress on Ultrasound in Medicine. Euroson 87, Helsinki, 14-18.

Willert CE, Gharib M (1991). Digital particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 10: 181–193.

World Meteorological Organization (WMO) (2008) *Guide to Hydrological Practices Volume I Hydrology – From Measurement to Hydrological Information* WMO-No. 168.

Wu X, Li D (2003) Range image registration by neural network. *Machine Graphics & Vision International Journal archive*. Vol 12: 257 - 266 ISSN:1230-0535

Yalin MS (1971) *Theory of Hydraulic Models*. Ed. Macmillan, London. ISBN 9780333035573.

Younkin BD, Hill DF (2009) Rapid Profiling of an Evolving Bed Form Using Planar Laser Sheet Illumination. *Journal of Hydraulic Engineering* 135(10): 852-856.

Zagorchev L, Goshtasby A (2006) A paint-brush laser range scanner. Journal Computer Vision and Image Understanding 101(2): 65-86.

Zhang Z (1999) A flexible new technique for camera calibration. 7th international conference on computer vision.

Índice de figuras

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.

- Figura 1.1. Escáner comercial en posición vertical fuera del agua.
- Figura 1.2. Velocímetro de imagen de partículas –PIV- en posición lateral.
- Figura 1.3. Equipo de bajo coste para medir el perfil transversal de un dique de escollera.
- Figura 1.4. Equipo de bajo coste para medir el perfil longitudinal de una playa.
- Figura 1.5. Principio de medida del escáner comercial.
- Figura 1.6. Resultado de medida del escáner como puntos y como malla de polígonos.
- Figura 1.7. Desviación de las medidas por refracción en dos dimensiones.
- Figura 1.8. Elevación aparente del fondo del canal debida a la refracción.
- Figura 1.9. Elevación aparente del fondo (r) en función del calado (y).
- Figura 1.10. Disminución de la altura aparente de los objetos debida a la refracción.
- Figura 1.11. Altura aparente (z_v) en función de la altura real (z_r) para diferentes calados (y).
- Figura 1.12. Desviación de las medidas por refracción en tres dimensiones
- Figura 1.13. Elevación y curvatura del fondo fuera del plano medio de simetría
- Figura 1.14. Superficies de un fondo de sedimentos: virtual –medida por el escáner- y real –una vez deshecha la transformación introducida por la refracción-.
- Figura 1.15. Imagen obtenida por un PIV en la que se observa el fondo de arena
- Figura 1.16. Valores de luminancia de diferentes columnas de la imagen PIV.
- Figura 1.17. Calibración de píxeles a unidades físicas en una imagen PIV.
- Figura 1.18. Uso acoplado del escáner 3D y el PIV en un estudio de erosión.
- Figura 1.19. Láser de nivelación utilizado en albañilería.
- Figura 1.20. Cámara digital de objetivos intercambiables.
- Figura 1.21. Deformación de la perspectiva en una imagen.
- Figura 1.22. Perfiles transversales en un dique de escollera.
- Figura 1.23. Imagen tomada con las marcas patrón de calibración.
- Figura 1.24. Perfiles obtenidos por el algoritmo de visión artificial. Las crestas identifican los eventos de oleaje.
- Figura 1.25. Evolución temporal del perfil de una playa de arena.
-
- Figura 2.1. Velocímetros de molinete y electromagnético.
- Figura 2.2. Velocímetro acústico doppler.
- Figura 2.3. Perfilador acústico doppler.

- Figura 2.4. Perfilador acústico en miniatura DOP2000.
- Figura 2.5. Perfil de velocidades obtenido por un DOP2000.
- Figura 2.6. Principio de funcionamiento de un velocímetro de imagen de partículas.
- Figura 2.7. Principio estadístico de correlación utilizado en la técnica PIV.
- Figura 2.8. Perfil de velocidades en la capa límite obtenido por un PIV (Peña 2002).
- Figura 2.9. Sensor de turbidez de infrarrojos.
- Figura 2.10. Variación de la medida de turbidez con el tamaño del sedimento (Battisto 1999).
- Figura 2.11. Tanque para la medida de concentración a través de la conductividad.
- Figura 2.12. Diseño de canal con depósito elevado y salida por vertedero.
- Figura 2.13. Diseño de canal con bombeo continuo.
- Figura 2.14. Sondas de conductividad para detectar la presencia del fondo.
- Figura 2.15. Sondas de conductividad para medir el espesor de la capa de sedimentos.
- Figura 2.16. Sondas de infrarrojos para detectar la presencia del fondo.
- Figura 2.18. Sensor acústico para medir la posición del fondo de sedimentos.
- Figura 2.19. Medida de una superficie 3D con sensores acústicos.
- Figura 2.20. Imágenes distorsionadas obtenidas por un sensor de ultrasonidos.
- Figura 2.21. Sensores de contacto para detectar la presencia del fondo de sedimentos.
- Figura 2.22. Medidas del oleaje y el perfil de playa con video (Foote y Horn)
- Figura 2.23. Medidas del oleaje y el perfil de playa con video (Erikson et al)
- Figura 2.24. Evolución del fondo y medida de velocidades (Adduce y LaRocca).
- Figura 2.25. Escáner 3D con campana para sumergirlo (Delft Hydraulics).
- Figura 2.26. Medida de estructuras del fondo con laser e imagen digital (Baglio, Faraci)
- Figura 2.27. Medida de estructuras del fondo con laser e imagen digital (Foti).
- Figura 2.28. Medida de superficies de fondo con laser e imagen digital (CIEM)
- Figura 2.29. Geometría de la visión estereoscópica.
- Figura 2.30. Formación de un plano laser con lentes cilíndricas.
- Figura 2.31. Refracción de un haz de luz al cambiar de medio de propagación.
- Figura 2.33. Dispersión cromática refractiva en un medio.
- Figura 2.34. Aberraciones cromáticas longitudinal y lateral.

- Figura 2.35. Chester Moore Hall y su sistema para corregir la aberración cromática.
- Figura 2.36. Inversión de imagen en una cámara de perspectiva o ‘pinhole’.
- Figura 2.37. Formación de una imagen con una lente.
- Figura 2.38. Distorsiones cilíndricas en una lente fotográfica.
- Figura 2.39. Transformación proyectiva entre planos no paralelos.
- Figura 2.40. Desplazamiento de la lente de acuerdo con el principio de Scheimpflug.
- Figura 2.41. Basculamiento de la lente de acuerdo con el principio de Scheimpflug.
- Figura 2.42. Lentes fotográficas especializadas tilt-shift.
- Figura 2.43. Evolución temporal by Lyubomir Zagorchev , A. Ardeshir Goshtasby de la sensibilidad ISO máxima (DxOMark)
- Figura 2.44. Sensibilidad ISO máxima frente al precio en dólares (DxOMark).
- Figura 2.45. Dirección y sentido de los ejes coordenados en una imagen digital.
- Figura 2.46. Mapeo de coordenadas en un estudio de flujo bicapa.
- Figura 2.47. Principio de operación el escáner Polhemus 3D.
- Figura 2.48. Diagrama de flujo de las técnicas de concordancia de patrones.
- Figura 2.49. Datos experimentales y patrón de ajuste para estudiar su correlación cruzada.
- Figura 2.50. Resultado de la integral paramétrica de correlación cruzada.
- Figura 2.51. Formas posibles de los datos, patrones y resultado de la correlación.
- Figura 2.52. Datos experimentales y patrón de ajuste en forma discreta.
- Figura 2.53. Resultado del sumatorio paramétrico de correlación cruzada discreta.
- Figura 2.54. Imagen digital obtenida por una cámara y patrón sintético de comparación.
- Figura 2.55. Funciones resultado de la correlación cruzada en dos dimensiones.
- Figura 2.56. Localización del máximo en la función de correlación cruzada.
- Figura 2.57. Función de correlación parabólica y muestreo para obtención de su máximo.
- Figura 2.58. Función de correlación triangular correspondiente a datos y patrones rectangulares.
-
- Figura 3.1. Escáner comercial Polhemus 3D. Pistola láser y unidad de control.
- Figura 3.2. Perfil de un fondo de sedimentos iluminado por el láser del PIV.
- Figura 3.3. Láser de nivelación de albañilería y cámara digital comercial.

- Figura 3.4. Forma de utilización de la pistola del Polhemus FastScan.
- Figura 3.5. Triangulación activa para la obtención de coordenadas.
- Figura 3.6. Descripción geométrica de las variables de la triangulación activa.
- Figura 3.7. Ejes coordenados locales y globales de las coordenadas de los puntos escaneados.
- Figura 3.8. Situación en el espacio de las bobinas electromagnéticas de posicionamiento.
- Figura 3.9. Malla de puntos obtenida por el escáner.
- Figura 3.10. Superficie representada por una malla de parches de triángulos.
- Figura 3.11. Menú de Polhemus FastScan para exportar la superficie de triángulos.
- Figura 3.12. Menú de Polhemus FastScan para guardar el resultado de la exportación.
- Figura 3.13. Conversión de coordenadas a un espacio normalizado.
- Figura 3.14. Interpolación de la coordenada z dentro de un triángulo.
- Figura 3.15. Imagen de la malla de triángulos exportada por el software.
- Figura 3.16. Imagen convertida a una malla rectangular en el plano horizontal.
- Figura 3.17. Bastidor robotizado para el desplazamiento del escáner.
- Figura 3.18. Soporte para el receptor de localización del escáner.
- Figura 3.19. Sonda de calados Greyline LIT25.
- Figura 3.20. Imagen de calibración del fondo plano del canal.
- Figura 3.21. Transformación introducida por la refracción en las medidas del escáner.
- Figura 3.22. Elevación teórica r (mm) del fondo en función del calado y (mm).
- Figura 3.23. Comparación teórico - experimental de la elevación virtual del fondo.
- Figura 3.24. Desviación de las medidas del perfil del fondo respecto de su valor medio para cada calado.
- Figura 3.25. Escaneado del objeto patrón sin agua.
- Figura 3.26. Transformación introducida por la refracción en las medidas del patrón.
- Figura 3.27. Relación teórica entre altura real y altura virtual, para distintos calados
- Figura 3.28. Perfiles del objeto patrón con diferentes calados.
- Figura 3.29. Relación experimental entre altura real y altura virtual.
- Figura 3.30. Desviaciones de las medidas del perfil del objeto respecto de las rectas de regresión con distintos calados.

- Figura 3.31. Triangulación activa en 3D. Vista espacial.
- Figura 3.32. Transformación introducida por la refracción en 3D.
- Figura 3.33. Elevación teórica de los perfiles en 3D.
- Figura 3.34. Modificación de la medida del fondo plano del canal debida a la refracción.
- Figura 3.35. Fondo plano medido por el escáner sin agua.
- Figura 3.36. Fondo plano medido con un calado $h=71$ mm.
- Figura 3.37. Fondo plano medido con un calado $h=143$ mm.
- Figura 3.38. Fondo plano medido con un calado $h=196$ mm.
- Figura 3.39. Fondo plano medido con un calado $h=250$ mm.
- Figura 3.40. Fondo plano medido con un calado $h=297$ mm.
- Figura 3.41. Fondo plano medido con un calado $h=355$ mm.
- Figura 3.42. Elevación promedio del fondo medida experimentalmente en 3D.
- Figura 3.43. Ajuste parabólico de los perfiles teóricos.
- Figura 3.44. Ajuste parabólico de los perfiles obtenidos experimentalmente.
- Figura 3.45. Correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie virtual deformada y los valores reales.
- Figura 3.46. Patrón de calibración para la identificación de puntos coincidentes.
- Figura 3.47. Imagen obtenida por el escáner 3D del patrón de calibración.
- Figura 3.48. Pirámide individual extraída de la imagen completa.
- Figura 3.49. Pirámide medida y pirámide generada sintéticamente.
- Figura 3.50. Correlación para la determinación del vértice.
- Figura 3.51. Parábola de valores de correlación.
- Figura 3.52. Puntos elegidos para el ajuste cuadrático.
- Figura 3.53. Diferencia entre los datos medidos y la pirámide que mejor se ajusta a ellos.
- Figura 3.54. Posiciones de los vértices obtenidas en la calibración.
- Figura 3.55. Patrón de calibración bajo una lámina de agua.
- Figura 3.56. Imagen del patrón obtenida bajo una lámina de agua.
- Figura 3.57. Imagen de un velocímetro de imagen de partículas con el plano laser iluminando la superficie libre y el fondo.
- Figura 3.58. Posición lateral de la cámara con un objetivo gran angular.
- Figura 3.59. Valores de luminancia de columnas, los máximos correspondientes a la posición del perfil PIV.
- Figura 3.60. Correlación de los picos de intensidad con una campana de Gauss.
- Figura 3.61. Perfil de máximos suavizado mediante una media móvil.

- Figura 3.62. Perfil extraído por el programa de la imagen PIV.
- Figura 3.63. Patrón de calibración del PIV.
- Figura 3.64. Láser de nivelación de albañilería.
- Figura 3.65. Cámaras de objetivos intercambiables utilizadas en el estudio.
- Figura 3.66. Posición del plano láser y la cámara para la toma de imágenes en los diques de escollera.
- Figura 3.67. Posicionador cartesiano para referenciar las medidas.
- Figura 3.68. Imagen real del posicionador en el tanque de oleaje del CITEEC.
- Figura 3.69. Patrón de calibración y laser montados en forma coplanaria en el bastidor.
- Figura 3.70. Imagen tomada por la cámara mostrando el patrón y la línea proyectada por el láser.
- Figura 3.71. Imagen con la perspectiva corregida.
- Figura 3.72. Imagen con la perspectiva corregida y una malla ortogonal superpuesta.
- Figura 3.73. Detalle de la imagen con el contraste aumentado par amostrar el perfil
- Figura 3.74. Comparación de los perfiles inicial y final para el estudio de daño estructural.
- Figura 3.75. Imagen del canal del CIEM mostrando las dianas de calibración.
- Figura 3.76. Imagen a color RGB extraida de la grabación de video.
- Figura 3.77. Imagen separada por capas de color roja y verde respectivamente.
- Figura 3.78. Valores de luminancia de una columna de píxeles.
- Figura 3.79. Imagen resultante de restar la capa verde de la capa roja.
- Figura 3.80. Detalle de imagen mostrando los defectos de la compresión MPEG.
- Figura 3.81. Imagen resultante de aplicar el filtro Gaussian blur.
- Figura 3.82. Correlación cruzada para la extracción de la línea proyectada por el láser.
- Figura 3.83. Perfil del fondo extraído de la imagen.
- Figura 3.84. Perfil del fondo extraído de la imagen con interpolación subpíxel.
- Figura 3.85. Imagen y perfil de fondo correspondientes a un evento run-down.
- Figura 3.86. Imagen y perfil de fondo correspondientes a un evento run-up.
- Figura 3.87. Evolución temporal (eje vertical) de los perfiles (eje horizontal y color).
- Figura 3.88. Distancia RMS entre dos perfiles consecutivos y detalle.
- Figura 3.89. Pesos de ponderación w_i para un filtro de suavizado Gaussiano.

Figura 3.90. Localización de los eventos run-up en la serie temporal de RMS.

Figura 3.91. Evolución temporal del perfil de playa.

Figura 4.1. Representación gráfica de los conceptos de exactitud y precisión.

Figura 4.2. Imagen PIV mostrando la posición del fondo iluminada por el láser.

Figura 4.3. Perfiles medidos tomando los máximos y con interpolación subpíxel.

Figura 4.4. Resultados de medida de 10 perfiles consecutivos.

Figura 4.5. Promedio de 10 perfiles consecutivos.

Figura 4.6. Error RMS en la medida de los perfiles para el caso $N=10$.

Figura 4.7. Error RMS en la medida de los perfiles para el caso $N=5$.

Figura 4.8. Patrón de calibración para las medidas del PIV.

Figura 4.9. Detalle ampliado de la imagen de las dianas de calibración mostrando una de ellas.

Figura 4.10. Oscilaciones en la medida del escáner 3D bajo una lámina de agua inestable.

Figura 4.11. Datos obtenidos por el escáner filtrados con una restricción morfodinámica.

Figura 4.12. Detalle de una imagen de video mostrando los defectos de la compresión MPEG.

Figura 4.13. Perfil obtenido por el equipo de video convencional.

Figura 4.14. Perfil filtrado mediante una restricción morfodinámica.

Figura 4.15. Evolución temporal del perfil de playa con los datos filtrados.

Figura 5.1. Canal de hidráulica de la ETSI Caminos, Canales y Puertos de la UDC.

Figura 5.2. Estructura de soporte y traslación del escáner 3D sobre el canal.

Figura 5.3. Equipo PIV situado en el canal.

Figura 5.4. Erosión de un fondo plano en régimen cuasiestático.

Figura 5.5. Erosión en la parte central del canal medida con el escáner 3D y el PIV.

Figura 5.6. Erosión en la parte central del segundo ensayo medida con el PIV.

Figura 5.7. Montaje para uso conjunto y acoplado de escáner 3D y PIV.

Figura 5.8. Evolución temporal de los sedimentos colmatados en un vertedero de aforo.

Figura 5.9. Diseño en plante del contradique y el espigón del puerto de Punta Langosteira.

Figura 5.10. Morro del dique formado por cubos de hormigón pintados de colores por secciones.

- Figura 5.11. Modelo a escala del contradique y espigón en el tanque de oleaje.
- Figura 5.12. Perfil del tanque de oleaje acondicionado para el ensayo.
- Figura 5.13. Planta del tanque de oleaje acondicionado para el ensayo.
- Figura 5.14. Sección transversal tipo mostrando las tres capas de construcción.
- Figura 5.15. Diseño en planta del contradique y espigón mostrando los puntos kilométricos de referencia.
- Figura 5.16. Perfiles comparados (rojo inicial - azul final), talud exterior contradique, Pks 375 y 350.
- Figura 5.17. Perfiles comparados (rojo inicial - azul final) talud interior contradique, Pks 350 y 325.
- Figura 5.18. Perfiles comparados (rojo inicial - azul final) talud interior espigón, Pks 238.5 y 225.
- Figura 5.19. Perfiles comparados (rojo inicial - azul final) talud exterior espigón, Pks 175 y 150.
- Figura 5.20. Nomenclatura de los diferentes elementos en un perfil de playa.
- Figura 5.21. Canal de Investigación y Experimentación Marítima de la UPC.
- Figura 5.22. Perfil de playa y ubicación de los instrumentos de medida.
- Figura 5.23. Canal del CIEM - UPC con la instrumentación de los ensayos CoSSedDM.
- Figura 5.24. Pared lateral del canal con diversos sensores montados.
- Figura 5.25. Perfiles en bruto obtenidos por el algoritmo de visión artificial.
- Figura 5.26. Evolución temporal del fondo en coordenadas de unidad de imagen. El eje de tiempo representa el número de olas, con un periodo medio de 15s.
- Figura 5.27. Perfil inicial de playa y evolución tras 50 y 100 olas.
- Figura 5.28. Evolución temporal de los puntos inferior, intermedio y superior del perfil.
- Figura 6.1. Cámara y láser convencionales para su uso como escáner 3D.
- Figura 6.2. Equipo láser con dos planos ortogonales para la medida en 3D.
- Figura 6.3. Mira láser de 20mW de potencia y color verde.
- Figura 6.4. Gama de cámaras Panasonic Lumix GH.
- Figura 6.5. Fotograma extraído de la grabación de video con la zona de swash parcialmente cubierta.
- Figura 6.6. Detalle del gráfico de RMS con diferentes formas de los eventos de run-down.

Índice de tablas

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.

Tabla 1.1. Comparación de sistemas de medida clásicos y los presentados en esta Tesis Doctoral (en negrita, todos los valores en milímetros).

Tabla 2.1. Comparativa de diferentes métodos para medir un fondo de sedimentos (Shepperd, 1996).

Tabla 2.2. Inventario de instrumentos para medir fondos de sedimentos de Hydralab.

Tabla 2.3. Coordenadas físicas y píxeles correspondientes en una imagen digital

Tabla 2.4. Coeficientes de la función de transformación de coordenadas.

Tabla 3.1. Matriz de puntos con sus coordenadas en el espacio.

Tabla 3.2. Matriz de caras con los vértices de cada triángulo.

Tabla 3.3. Calados de agua para los experimentos de fondo plano.

Tabla 3.3. Coordenadas físicas y en píxeles de las dianas de calibración.

Tabla 3.4. Coeficientes de la función bilineal de transformación.

Tabla 4.1. Comparación de sistemas de medida clásicos y los presentados en esta Tesis Doctoral.

Tabla 5.1. Condiciones de oleaje de los experimentos del proyecto CoSSeDM

Anexos

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.

Anexo 1. Listado de contribuciones a congresos.

Autores: Jerónimo Puertas Agudo, Enrique Peña González, Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache

Título: Experimental techniques for sediment transport using PIV and 3D Scanning Technologies

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: International Conference on Fluvial Hydraulics. River Flow 2002

Publicación: 90-5809-509-6

Lugar de celebración: Louvain-la-Neuve (Bélgica)

Fecha: del 03/09/2002 al 06/09/2002

Autores: Jose Anta, Enrique Peña, Félix Sánchez-Tembleque, Jerónimo Puertas

Título: An experimental study of a two-layer flow above a submarina sill using PIV

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: 32nd IAHR World Congress: Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics

Publicación: 9788889405062

Lugar de celebración: Venecia (Italia)

Fecha: del 01/07/2007 al 06/07/2007

Autores: Jose Sande, Enrique Maciñeira, Javier Ferreras, Fernando Costa, Félix Sánchez-Tembleque, Andrés Ruiz, Fernando Noya, Victoria Bajo

Título: Physical modelling of two adjacent rubble mound breakwaters. Optimal design for Third Phase Langosteira Port (A Coruña, Spain)

Tipo de participación: Comunicación

Congreso: 4th international Coastlab conference

Publicación:

Lugar de celebración: Gante (Bélgica)

Fecha: del 17/09/2012 al 20/09/2012

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.

Experimental techniques for sediment transport using PIV and 3D scanning technologies

J. Puertas & E. Peña

Civil Engineering School, University of A Coruña, A Coruña, Spain

F. Sánchez-Tembleque

Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC), University of A Coruña, A Coruña, Spain

ABSTRACT: Flow and sediment transport processes require, increasingly, experimentation studies in order to validate the numerical models and to estimate variations in rivers and channels. Modern technologies are providing tools used in hydraulic and morphological research, making easier experimental field and laboratory work. This research shows real time velocity and displacement fields, in order to estimate variations in hydrodynamics, riverbed or shear stress. Particle Image Velocimetry and 3D Scanning instrumentation are used to determine velocity field, water depth and bed evolutions in a laboratory flume. Taking into account the refraction of the water, these tools provide high-resolution results to estimate real time displacement of sediments in the channel and the evolution of the velocities. Experiments with sediments of various grain sizes and flow conditions are being held in the Civil Engineering School and CITEEC installations of the University of A Coruña, Spain.

1 INTRODUCTION

This work presents the tools of the Fluvial Hydraulics research group of University of A Coruña, Spain, is using in laboratory experiments. Past research developed bidimensional numerical models to estimate the flow and sediment and pollutant transports, using Finite Volume and Finite Element Methods. An important effort was made to acquire precise and new instrumentation tools to validate and calibrate these models.

2 PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY (PIV) INSTRUMENTATION

PIV has become an important tool for non-intrusive measurement of flow phenomena. The principal advantage of the system is its ability to measure the whole velocity field in a plane at the same time. This is important not only to save time in stationary flows but also to measure unsteady *phenomena* up to 5 times per second.

The flow is seeded with tiny particles, the so called tracer, in this case 70 micron glass spheres. By cylinder optics a laser beam is formed to a light sheet. The double pulsed Nd-YAG laser illuminates the tracer in this plane twice within a short time interval. The light scattered by the particles is recorded in a double frame of an ultra-fast shuttered CCD camera.

Assuming that tracers follow the flow with the local velocity, from the position of the particles in the first and second frame and the delay time between them, the velocity field of the hole plane may be computed. The digital recording is divided in small subareas (interrogation windows) and statistical correlation techniques determine one local displacement vector for each window.

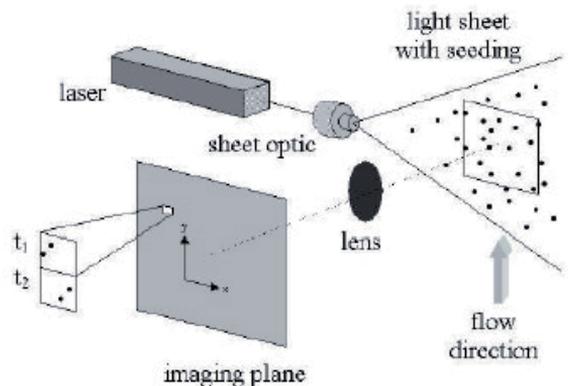


Figure 1. Operation of Particle Image Velocimetry instrumentation

Particle Image Velocimetry includes an automatic calibration procedure with a pattern introduced into the flow that assures the correct relationship between absolute distances (and thus velocities) and the pixels in the camera frames. PIV correlation techniques allow to discriminate displacements of 0.1 pixels, so that if the interrogation area is chosen to be 32x32 pixels and the particles move from the centre to the border, the accuracy is about 1%. This calibration also allows to measure the bed profile, illuminated with the laser and recorded in the frames.

3 THREE-DIMENSIONAL SCANNING INSTRUMENTATION

3.1 Origin and application

The use of 3D laser scanner to digitize the surface of an object is a well known technique. The principle of operation is to project a fan of laser light on the object while two cameras view the line with different perspective, just as our stereoscopic vision does.

There are some available commercial equipments which provide the hardware and software needs to do the complete measure of the surface, and export the data to several industrial standard formats. The aim of this study was to provide an experimental set-up to scan the surface of an object under water. This requires to retrieve the transformation produced by the refraction of the laser beam.

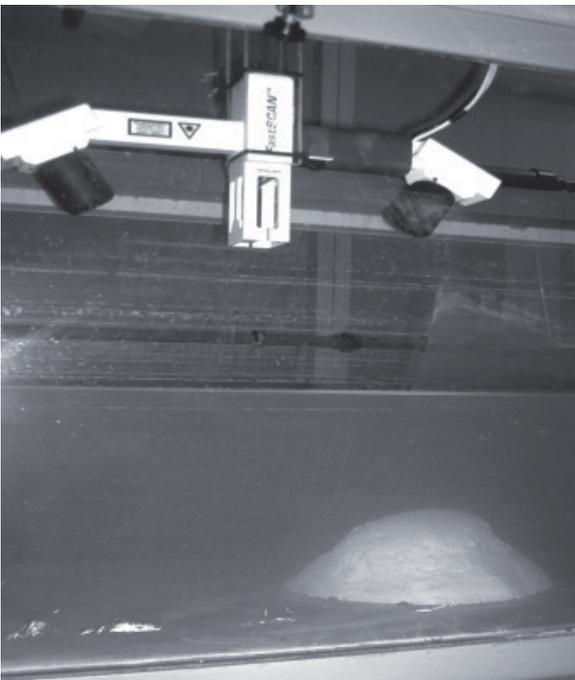


Figure 2. 3D Scanning Instrumentation

The facilities will then be used to study transient flows involving erosion and sedimentation in rivers, estuary and coastal regions, using the scanner to digitize the bed profile. Measurements were made by smoothly sweeping a lightweight gun (or 'wand') over the object, in a similar way as spray painting, as seen on figure 2.

An automatic translation stage was used to assure rectilinear moving of the wand, necessary to undo the refraction deformation of the image backwards. The software of the scanner exports a cloud of points and a triangle mesh transformed by interpolation to a regular mesh in the bottom xy plane, so comparisons may be performed in normal z axis.

3.2 Refraction problem

When the laser fan of usually 25 degrees of divergence enters the water refraction must be taken into account. The images of the line over the objects viewed by the cameras have the same bending problem of the light direction. The first measurement approach involves a plane water surface normal to the laser beam and accounts only for the central line of the surface profile. Thus only refraction on the camera images occurs, and this only happens on the xz plane. In this central xz plane, the refraction can be shown in next figure 3.

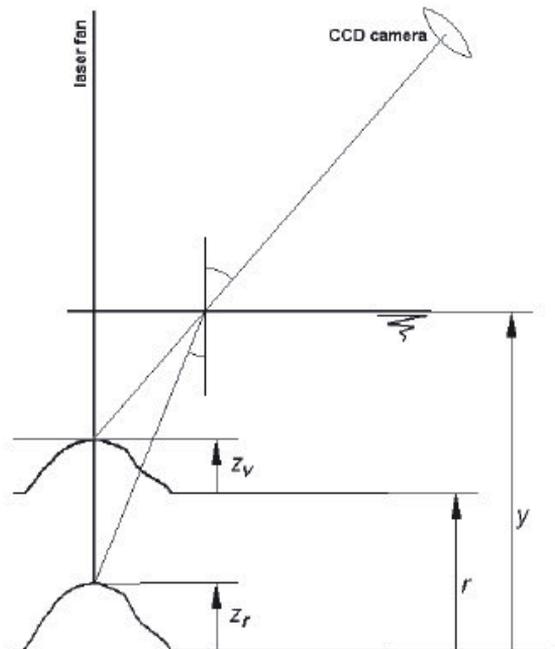


Figure 3. Refraction of laser fan in water

3.3 Calibration of 3D Scanning instrumentation

Three dimensional Scanning instrumentation needed many experiments in order to take into account the refraction problem, allowing adequate measurements. First, images of the channel bottom were taken under different water depths, to measure the apparent (or virtual) depth. Representing this elevation r (or offset, with and without water) compared with water depth y , the results may be linearly correlated (Figure 4)

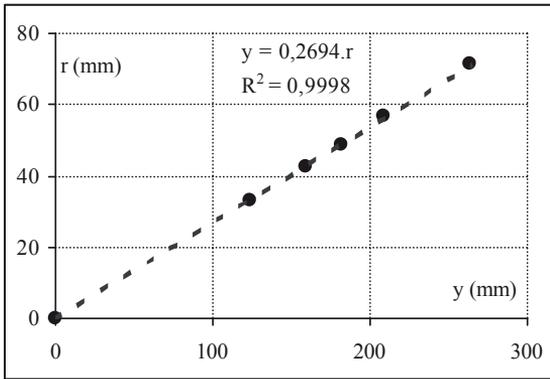


Figure 4. Comparison between water and offset depths (x axis is water depth, y axis is depth offset)

In the second series of experiments a concrete calibration pattern was introduced in a 50x50 cm, 15 m long current flume to study again the central xz plane (x along the flume, z normal to the flume bed). Figure 6 shows that once the real depth (obtained in the first experiment) is subtracted as an offset, the stone virtual profile does not vary with different water depths, and the relationship between the real zr and the virtual profile zv is almost linear if heights z are compared.

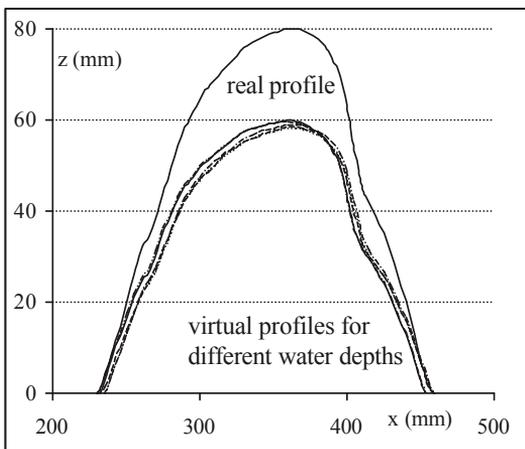


Figure 5. Profiles of concrete pattern with variable depth

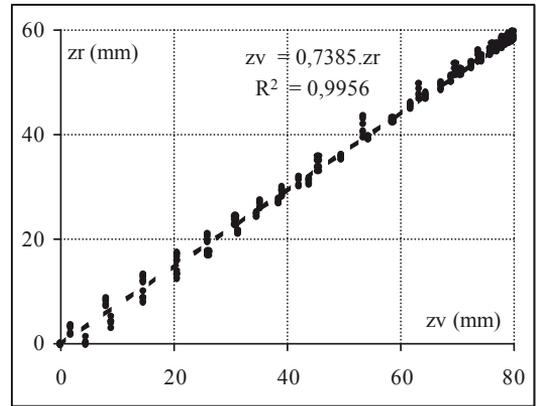


Figure 6. Comparison between real (x axis) and virtual levels (y axis), correlation $R^2 = 0,9956$

4 CAPABILITIES OF PIV AND 3D SCANNING TOOLS

4.1 Coupled operation

The potential of these tools is the possibility of working coupled. PIV outputs are velocity distribution in each vertical water column and the evolution of the sediment surface. These data also allows to relate measurements with other variables related with this *phenomena*, like shear stress, shear velocity or the prediction of erosion and sediment displacements, and its relation with bedload transport formulas.

Scanning instrumentation define the bottom evolution in the three directions of the zone of study. Coupling these instruments, real time measures of the whole velocity field and the bed profile can be obtained, not only in the xz plane but also normal to the flow direction.

4.2 Case study

In the next paragraph an example that we developed using both PIV and 3D Scanning instrumentation is presented, analysing the processes of erosion and hydrodynamic evolution of a specific problem.

The Neyropic weir is a common discharge measurement structure, with a well known depth-discharge curve. Weirs and spillways require geometric specifications that may vary in time due to colmatation processes. A particle image velocimeter (PIV) and 3D Scanning instrumentation were used in this experiment to study the change in the flow conditions, testing and validating a hydrodynamic and sediment transport numerical model. Velocities, depths and sediment elevations were measured to analyse the loss of efficiency of the Neyropic module while geometric characteristics were being changed.

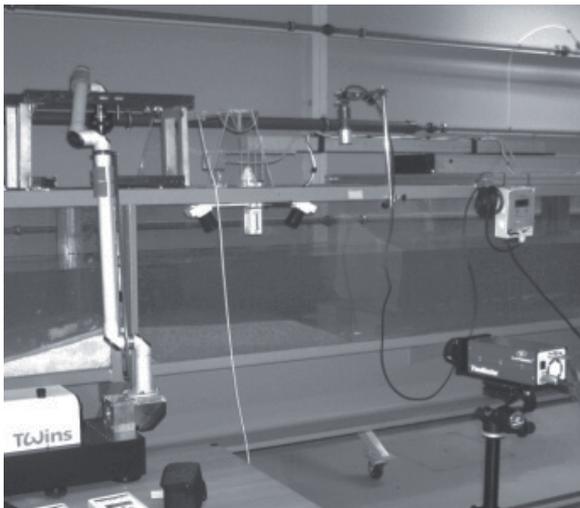


Figure 7. Experimental set-up for Neyrpic weir

The PIV allowed to measure both the velocity field and the bed profile showing the sediment upstream the Neyrpic. Some tests reached the equilibrium profile with different flow conditions.

The Neyrpic weir was inserted in a 50 x 50 cm, 15 m long flume of variable slope and discharge up to 100 liters per second. In the central channel section an extruded polystyrene Neyrpic weir was placed with its upstream section under the laser fan of the PIV system. Cameras recorded images of a xz plane, allowing record velocity fields in the hole plane and the profiles of the bottom and the water surface. The results from the PIV system were also used as a reference to test a 3D scanner that digitises the bed surface. The flow was seeded with 70 micron ceramic particles.



Figure 8. Neyrpic weir with 1 mm sand simulating a broad-crested weir

Sediment transport was studied under two different discharges, 40 and 70 l/s. The channel was horizontal for both tests, covering the Neyrpic module with a median diameter sand of 1 mm simulating a broad-crested weir. Experiments were finished when no more variation of the measured channel bottom was detected.



Figure 9. Final bed profile

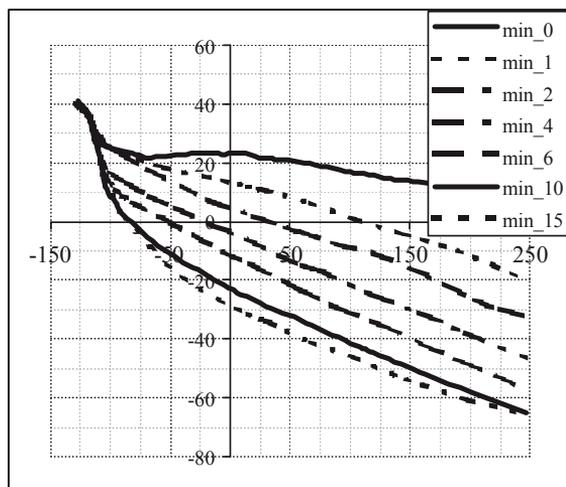


Figure 10. Evolution of sediment surface with time using PIV, for a discharge 70 l/s, median diameter of sediment 1 mm

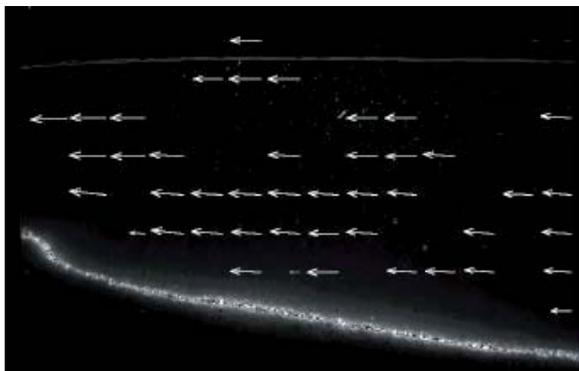


Figure 11. Velocity field upstream of Neyrpic weir using PIV for conditions as in Figure 10

5 CONCLUSIONS

Two high accuracy tools to be used in riverbed and sediment transport studies have been presented. Particle Image Velocimetry can measure real time velocity and shear stress fields and a 3D surface scanner is giving us accurate measures of the temporal evolution of the sediment surface. The coupling of both technologies allows us to acquire data of unsteady phenomena under water with a non intrusive technique. These data will be used to calibrate numerical models for both the hydrodynamics and the erosion and sediment transport, as well as to study actual hydraulic structures at the laboratory or in the field. After a calibration of the whole system to work together, one practical study of the loss of efficiency of a Neyrpic weir with sediment transport has been presented.

REFERENCES

- Bos, M.G. 1989. Discharge measurement structures. *International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). Wageningen (The Netherlands).*
- Chanson, H. 1994. Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. *Oxford, Pergamon.*
- Novak, P. & Moffat, A. I. B., Nalluri, C., Narayanan, R. Hydraulic structures, *London, E&F Spon.*
- Peña, E. & Valiño, H. & Rabuñal, J. & Puertas, J. 2000. Estudio del rendimiento de un dispositivo de aforo tipo Neyrpic con distintos grados de colmatación. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica – Córdoba 2000, I: 747-757.*
- Polhemus 1998. Hand held laser scanner user's manual. *Colchester, Vermont (USA) Polhemus Incorporated.*
- Raffel, M. & Willert, C.E. & Kompenhans, J. 2000. Particle image velocimetry. A practical guide. *Berlin, Springer 3rd edition.*

AN EXPERIMENTAL STUDY OF A TWO-LAYER FLOW ABOVE A SUBMARINE SILL USING PIV

Anta Jose⁽¹⁾, Peña Enrique⁽²⁾, Sánchez-Tembleque Felix⁽³⁾, Puertas Jerónimo⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Civil Engineering School, Hydraulics Engineering, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña, Spain

phone: +34 981 167000 ext 1545; fax: +34 981 167170 e-mail: janta@udc.es

⁽²⁾ Civil Engineering School, Hydraulics Engineering, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña, Spain

phone: +34 981 167000 ext 1544; fax: +34 981 167170 e-mail: epena@udc.es

⁽³⁾ Center of Technological Innovations in Construction and Civil Engineering, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña, Spain

phone: +34 981 167000 ext 5198; fax: +34 981 167170; e-mail: fsanchez@udc.es

⁽⁴⁾ Civil Engineering School, Hydraulics Engineering, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15091 A Coruña, Spain

phone: +34 981 167000 ext 1430; fax: +34 981 167170 ; e-mail: jpuertas@udc.es

ABSTRACT

In nature, certain connected water bodies produce exchange gravimetric flows due to density differences, caused by variable concentrations of elements such as salt, sediment, or temperature. This study presents a brief description of these kinds of flows, including an experimental study of stratified exchange flows over a submarine sill. The hydrodynamic characterization has been developed using imaging analysis techniques and Particle Image Velocimetry in order to characterize the exchange gravimetric surface and the velocity fields. The results are compared with those obtained with a bidimensional numerical model that applies the finite volume method to the depth-averaged two-layer flow equations (García, 2005).

Keywords: Stratified exchange flows, Internal hydraulics, Particle Image Velocimetry, Hydrodynamics

1 INTRODUCTION

Two-layer flows are common in studies involving river mouths and estuaries, oceanographic currents and atmospheric flows, since different densities appear in water or air domains. Another typical situation is the transport of pollutants in rivers or other locations, when these pollutants have a significant variation in density or temperature with regard to the water body. These types of flows are clearly identified since there are two different layers. Hence, the flow is stratified into two water bodies, one on top of the other.

A clear example of these flows would be the exchange water flows in the Strait of Gibraltar. In this case two layers between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea are present. On the one hand, the cold and less saline water bodies from the Atlantic Ocean rise up to the surface and penetrate the Mediterranean Sea. On the other hand, the warmer, denser water bodies from the Mediterranean Sea flow thorough the Atlantic Ocean.



Fig. 1 Wave generation in the exchange two-layer flow in the Strait of Gibraltar

The objective of this work is to develop a series of hydraulic tests with two-layer flows to analyze the shear stress interactions and the whole problem process. Secondly, the experimental results are used to compare and validate a bidimensional numerical model applying finite volume method to depth-averaged two-layer equations, developed by the Research Group Mathidro, to which the authors of this communication belong, and developed, by García (2005).

The hydrodynamic characterization was carried out through Particle Image Velocimetry, a non-intrusive technique used to obtain the whole velocity field on a plane at any time in unsteady flow. The application of this technique in two-layer flows is relatively recent and has moved forward to validate both numerical and theoretical models with high precision experimental results (Zhu and Lawrence, 2000; Negretti *et al.*, 2005). Other research works have been focused in the developing of interfacial instabilities (Zhu and Lawrence, 2001), mixing and entrainment processes (Pawlak and Armi, 1998; Morin *et al.*, 2004).

In this work we present the experimental results of a two-layer flow in a channel with a Gaussian bell-shaped submarine sill.

2 HYDRAULICS OF EXCHANGE FLOWS

Preliminary studies of two-layer flows were carried out by Schif and Schonfeld in 1953 (cited by Negretti *et al.*, 2005). These authors extended the one-layer hydraulics to two-layer hydraulics in estuaries. Armi (1986) and Farmer and Armi (1986) systematized the two-layer bidirectional flows by analysing hydrodynamics as the boundary conditions changed. This theoretical study, commonly known as internal hydraulics, is the frame of reference for two-layer flows.

In this paper the theoretical study is focused on interactions with a bidimensional obstacle, a submarine sill placed in a rectangular channel with a constant section that connects two water bodies having different densities. The water body located on the left-hand side of the channel is the one with greater density, while the one on the right contains less saline water. In this case, the upper layer moves from right to left. The flow depth is represented as H . Fig. 2 presents a scheme of this two-layer process.

The main tool used to analyze the stratified flow in internal hydraulics is the location of the internal control points. Farmer and Armi (1986) proved that in the scheme presented in

Fig. 2, there are two potential control points: one located over the sill and the other one at the beginning of the left-hand side of the channel (entrance of water with greater density). At these points, the flow is critical and the composite (or internal) Froude number is unity (Armi, 1986). This parameter is defined as:

$$G^2 = F_1^2 + F_2^2 \quad (1)$$

where G is the internal Froude number and F_i is the densimetric Froude number defined for each layer as:

$$F_i^2 = \frac{U_i^2}{g' h_i} \quad (2)$$

where U_i is the mean velocity of layer i , g' is the reduced gravitational acceleration defined as $g' = g(\rho_2 - \rho_1)/\rho_2$, where ρ_1 and ρ_2 are the density of the upper and lower layer respectively, and h_i is the depth of the layer i .

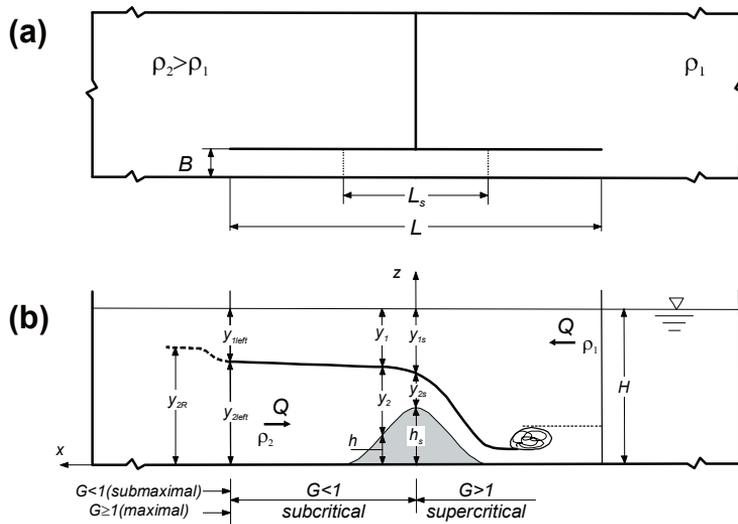


Fig. 2 Scheme of two-layer flow over a submarine sill a) plan view and b) side view (after Zhu y Lawrence, 2000)

If $G < 1$ the flow is internally subcritical, whereas if $G > 1$ the flow is internally supercritical. The flow is internally critical if $G = 1$. These kinds of regimes can be obtained with the modification of the interference depth y_{2R} in the water body with the greater density.

The locations with $G = 1$ are defined as internal hydraulic controls. Farmer and Armi (1986) identified two basic typologies of flow: maximal exchange and submaximal exchange flows, depending on the number of internal controls. In this way, maximal exchange flows are characterized by the presence of two internal hydraulic controls, whereas the submaximal exchange flows have only one internal control.

The large waves produced in the exchange of the two layers cannot propagate out of the supercritical regions, but they are able to do so in the subcritical locations. As mentioned earlier, there are two control points in maximal exchange flows, so the flow is isolated between these two sections, and the modifications of the water body boundary conditions cannot be communicated through the channel if $G > 1$.

The exchange flow is commonly analyzed as two layers of a non-viscous homogenous flow. The vertical velocities are negligible and usually omitted. As a result, the pressure distribution is assumed to be hydrostatic, so shallow water equations are applied to each layer.

The results of the analysis are the flows and thickness of each layer.

Nevertheless, the bottom and inter-layer friction must be introduced into the analysis. Hence, the values obtained must be decreased. Also, the velocity gradients of the exchange layers may produce hydrodynamic instabilities in the water surface leading to vertical mixing and flow entrainment at the interface of the two-layers (Zhu and Lawrence, 2001). Another key factor is the curvature of streamlines in certain situations, for example the submarine sill studied in this case, which may affect the pressure distribution flow (Zhu and Lawrence, 1998).

These circumstances may invalidate the internal hydraulics hypothesis. Some studies warn of this hazard and also cite the lack of accuracy of some theoretical solutions for a two-layer flow over a submarine sill (Zhu and Lawrence, 2000, Morin et al., 2004).

3 EXPERIMENTAL INVESTIGATION

The main purpose of this work is to analyze the exchange flow produced in a channel with a submarine sill, in order to obtain high-precision experimental results and compare them with those obtained using the numerical model developed by García (2005).

The series of tests with a two-layer flow were developed in the Center of Technological Innovations in Construction and Civil Engineering (CITEEC) of the University of A Coruña (Galicia, Spain). The tests were conducted in a channel closed at both ends, 20 meters long and 0.6 meters wide, with the measurements focussing on a narrower section, 1 meter in length and 0.1 meters wide in the central part of the channel.

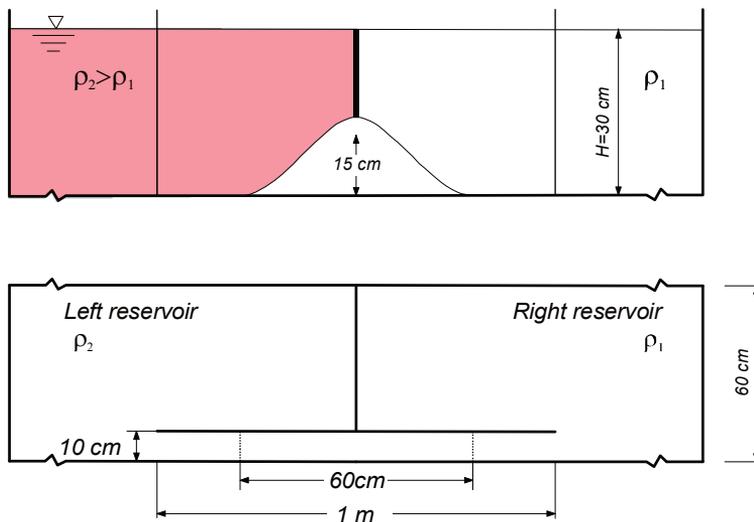


Fig. 3 Hydraulic channel, submarine sill and water bodies

A sill was placed in the bottom of the channel. The shape of the sill is described by the following equation and is also used in the numerical test of the numerical model:

$$h(x) = 15 \cdot e^{-x^2/225} \text{ for } -30 < x < 30 \quad (3)$$

A pneumatic barrier was placed over the sill crest in order to divide the flume into two reservoirs. Tests were carried out with a water depth of 30 cm. An amount of salt (10 kg of NaCl) was added to the left-hand reservoir and was mixed with the aid of a mechanical stirring rod. The density of each water body was determined using the tables for a sodium chloride solution from Lide (1997). With this amount of salt, a reduced gravitational

acceleration g' value of $1.9 \text{ cm}^2/\text{s}$ was produced for the experimental procedure.

Prior to the PIV experiments a test was carried out with a conventional video camera and Rhodamine WT colorimetric tracer in the left-hand reservoir. Images recorded with this camera have a resolution of 720×540 pixels and a 25 fps frame rate. For PIV experiments the water in both reservoirs was seeded with glass spherical particles of $10 \text{ }\mu\text{m}$ and a specific density of 1.05. PIV equipment, manufactured by LaVision, has a Nd:Yag laser and was configured for collecting images at a frame rate of 2.5 Hz .

PIV tests were conducted for 5 minutes, which enabled us to analyze maximal exchange flow. A digital CCD camera with a 1024×2024 pixel resolution was used to record a visualized domain of $50 \times 50 \text{ cm}$ with a spatial resolution of 0.05 cm/pixel . For processing the recorded images DaVis software was used, employing a cross-correlation algorithm. An adaptive multipass routine was used, starting from an interrogation window of 64×64 pixels and ending with a final window size of 16×16 pixels with a 50% overlap. The velocity vectors were post-processed using a local median filter.

5 RESULTS

5.1 CONVENTIONAL VIDEO TESTS

The main objective of this experiment was to achieve a direct observation of exchange flow phenomena as well as to estimate a rough mean velocity value to set up the acquisition parameters of the PIV equipment. This test was recorded for 8 minutes.

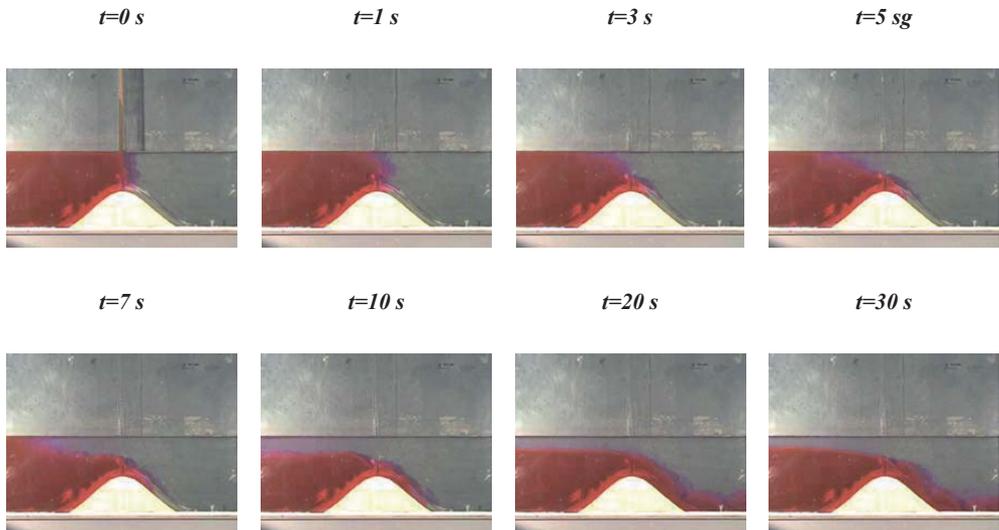


Fig. 4 Conventional digital video test series

After recording the test, an image with a calibration pattern was taken. The calibration pattern has a series of crossed marks equidistant in a horizontal and vertical direction 20 mm . This pattern was later employed to convert the image data, in pixels, into real ones, in meters. For this purpose a bilinear transformation was carried out.

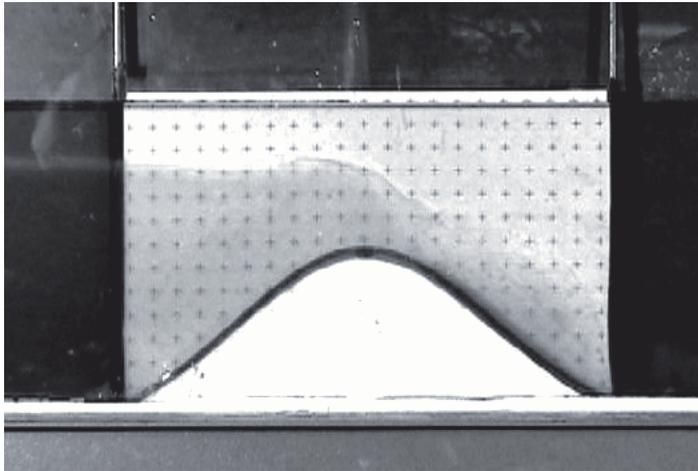


Fig. 5 Image pattern used in conventional video tests

Digital Image toolbox from MatLab software was used to determine the gravimetric interface between two-layers. An averaged image was calculated using 10 consecutive images recorded after 4 minutes, from the start of the test. For this calculation only the green layer of the RGB files was employed. The same methodology was used to determine the initial movement of two-layer exchange flow (see Fig. 6).

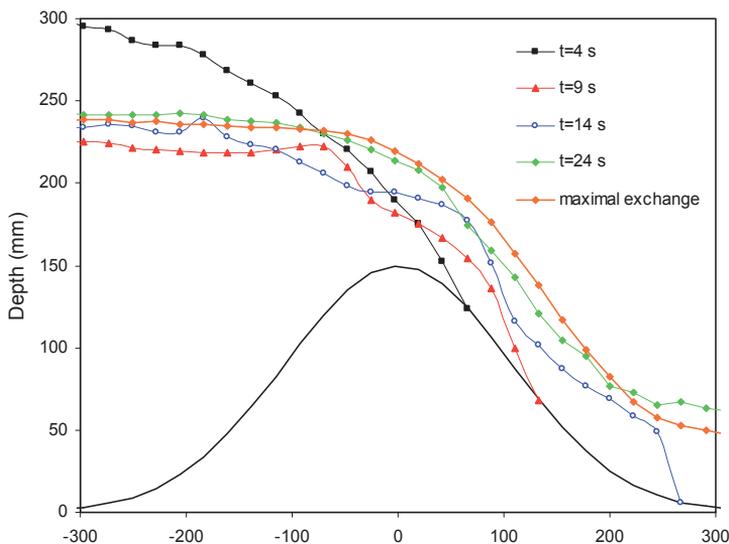


Fig. 6 Initial movement of two layer flow over the submarine sill

5.2 PIV TESTS

Using PIV in stratified flow measurement over a sill is a quite recent skill. The application of 2D PIV may provide some information of flow properties such as the velocity profiles, velocity gradients, flow vorticities and shear stresses. Furthermore, PIV technique is an useful tool to analyze turbulence, at least in the spatial scale, flow structures and the

formation and evolution of interfacial instabilities in stratified flow tests.

Preliminary results obtained are shown in this paper. Fig. 7 a) shows the velocity field averaged over 7 seconds taken at $t=200$ s, where $t=0$ is the start of the experiment. On the right-hand side of the sill an anti-clockwise recirculation flow can be seen. Over the sill crest, the mean velocity in the lower layer is 3.2 cm/s and 1.8 cm/s in the upper layer.

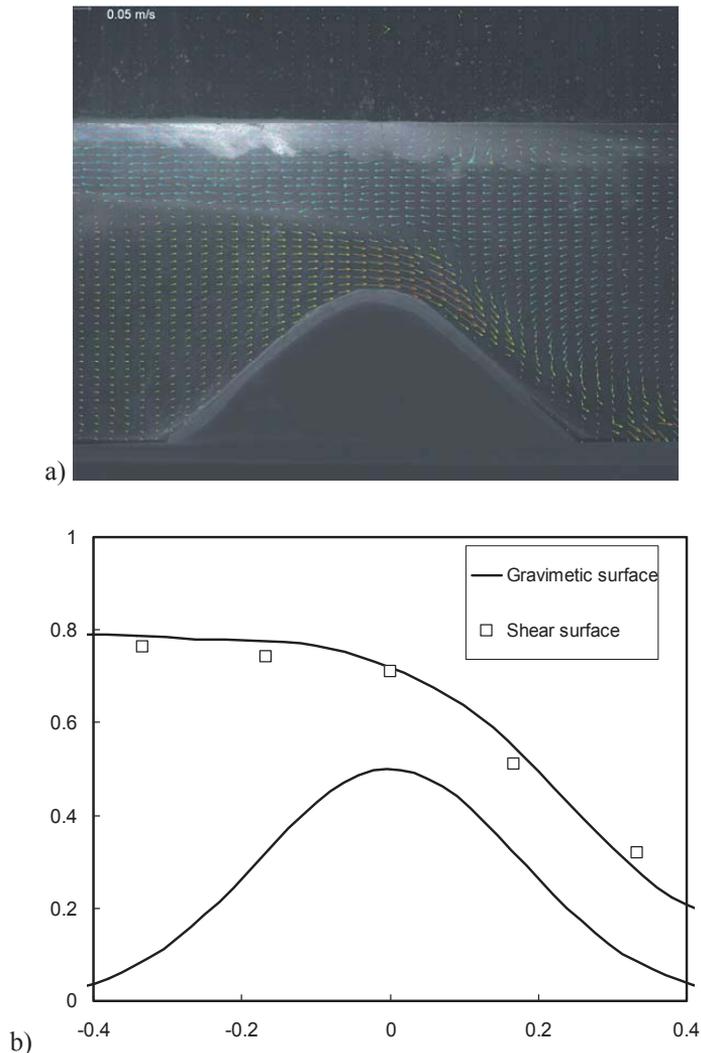


Fig. 7 PIV results of density stratified exchange flow over a sill a) averaged velocity fields between 200 s and 207 s. b) Comparison between the gravimetric surface (obtained from conventional video test) and the shear layer (zero velocity surface, obtained with PIV recordings).

In Fig. 7 b) the axes are normalized with the sill length (60 cm) in a streamwise direction and with the water depth (30 cm) in a vertical direction. This figure shows the comparison between the gravimetric interface, obtained from a conventional video test, and the shear layer, defined as the interface between layers with zero velocity. Both measurements denote a good fit.

5.3 COMPARISON WITH THE NUMERICAL MODEL

This section presents a comparison between the experimental results from a two layer flow test over a submarine sill, and the numerical results from the finite volume model developed by García (2005).

Fig. 8 shows gravimetric interface and shear layer measurements as well as numerical results. Poor agreement was found between the numerical and experimental results. This lack of accuracy also appears in the classic analytic solutions of exchange flow over a sill reported by Farmer and Armi (Zhu and Lawrence, 2000).

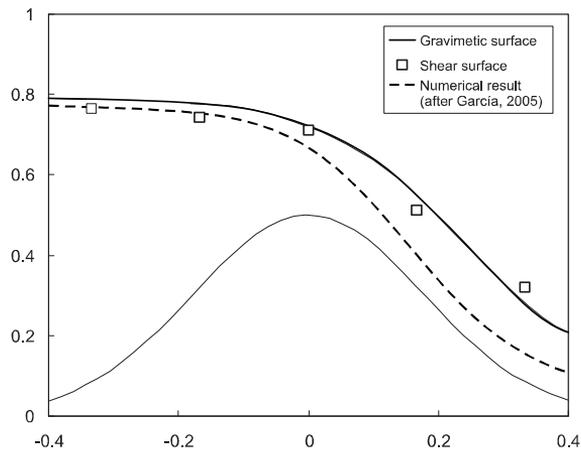


Fig. 8 Comparison between the gravimetric interface, shear layer and numerical solution obtained by García (2005)

The differences may be attributed to the simplifications used in the numerical model, although there may have been some error in the experimental measurements. The numerical model omits the effects of streamline curvature because of the fact that it is a 2D depth-averaged two-layer finite volume. Furthermore, the effects of friction between layers are not included. Another phenomena omitted in the numerical formulation is hydrodynamic instability which leads to vertical mixing in the interface and entrainment flows between layers, such as the recirculation flow shown in Fig 7 a).

Regarding the experimental setup, the slight difference found in the densities of the water bodies in the test conducted here caused low gravimetric exchange velocities. Because of this, PIV measurements entail uncertainties due to buoyant effects in tracer particles and low particle displacements. In fact, there are several sources of error which are difficult to address through direct experiments (Smits and Lim, 2000). This is one of the main topics in revision process in the literature (Schröder, 2007).

A rough estimation of buoyant effects is developed through the use of Stoke's Law (Raffel *et al.*, 1998). Using this formula with a particle size of 100 microns, to account for irregular particle distribution and floc formation, settling velocity of particles is hundred times lower than the mean velocity in the upper layer over the sill. Precision of particle displacements was initially limited to the pixel dimension, although the introduction of sub-pixel interpolation algorithms (Willert and Gharib, 1991) has improved it substantially. It has become widely accepted a working precision of 0.1 pixel. For an area 50 centimetres wide, the precision in the distances (and thus the velocities) scale is of 50 micrometers.

In future experiments uncertainties in velocities will be reduced using a higher salt concentration in the denser fluid, and also with an improved seeding procedure.

4 CONCLUSIONS

This paper has presented experimental research on gravimetric exchange flow. This hydraulic phenomenon occurs when two water bodies with different densities are connected by a narrow channel. The main objective of this study deals with the application of laser technology in the hydrodynamic characterization of two-layer flows. In this particular case, particle image velocimetry (PIV) and conventional video techniques as well as colorimetric tracers were used to obtain the velocity fields and to define the interface of layers, respectively.

Tests of exchange flow over a submarine sill were conducted at the facilities of the CITEEC (University of A Coruña, Galicia, Spain). Although some problems were found in the experiments due to the low velocities generated in the exchange flow, in general the PIV technique was applied successfully.

In the tests carried out on vector velocity fields were determined in practically the entire visualized domain. Some problems have arisen in the definition of velocity fields downstream of the sill (in the right-hand reservoir). These problems are caused by the high turbulence appearing in this area due to the formation of an internal hydraulic jump and by the high acceleration of the fluid downstream of the sill.

The gravimetric interface and the initial movement between the two layers were characterized through conventional video tests. The interface obtained was compared to the numerical solution of the same problem reported by Garcia (2005). Some differences between experimental and numerical results were found. These differences have been reported in other experiments reported in the literature (Zhu and Lawrence, 2000 and Morin et al., 2004) and may be due to the fact that the numerical scheme omits the effects of friction between layers, non-hydrostatic pressure distribution and entrainment processes induced by the generation of hydrodynamic instabilities in the two-layer interface.

REFERENCES

- Armi L. (1986), The hydraulics of two flowing layer with different densities, *Journal of Fluid Mechanics*, 163, 27-58
- Farmer D.M. and Armi L. (1986), Maximal two-layer exchange over a sill and through the combination of a sill and contraction with barotropic net flow, *Journal of Fluid Mechanics*, 164, 53-76
- García, J.A. (2005), Paralelización de esquemas de volúmenes finitos: aplicación a la resolución de sistemas de tipo aguas someras, *PhD Dissertation* (in spanish). University of Málaga.
- Lide, D.R. (1997), CRC Handbook of chemistry and physics, 77th edition, *CRC Press*, Florida.
- Morin V.M., Zhu D.V. and Loewen M.R. (2004), Supercritical exchange flow down a sill, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(6), 521-531
- Negretti M.E., Zhu D.Z., Weitbrecht V. and Kirka G.H. (2005), Experiments on stratified exchange flows pas a submerged sill, in *Proceedings of XXXI IAHR Congress (Seoul)*, pp. 2302-2311.
- Pawlak G. and Armi L. (1998), Mixing and entrainment coefficient in developing stratified currents, *Journal of Fluid Mechanics*, 424, 45-73.
- Raffel M., Willert C. and Kompenhans J. (1998), Particle Image Velocimetry, A Practical Guide, *Ed. Springer-Verlag*, Berlin, Germany.
- Schröder A. (2007), *Course notes of 15th PIV Course. Theory and Applications*. Andreas Schröder course coordinator, DLR Göttingen, Germany.
- Smits A.J. and Lim T.T. (2000), *Flow Visualization. Techniques and examples*, Imperial

College Press, London.

Willert C.E. and Gharib M. (1991), Digital particle image velocimetry, *Experiments in Fluids*, 10, 181-193

Zhu D.Z. and Lawrence G.A. (1998), Non-hydrostatic effects in layered shallow water flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 355, 1-16.

Zhu D.Z. and Lawrence G.A. (2001), Holmboe's instability in exchange flows, *Journal of Fluid Mechanics*, 429, 391-409.

Zhu D.Z. and Lawrence G.A.(2000), Hydraulics of exchange flows, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126 (12), 921-928.

Physical modelling of two adjacent rubble mound breakwaters. Optimal design for Third Phase Langosteira Port (A Coruña, Spain)

J. SANDE⁽¹⁾, E. PEÑA ⁽¹⁾, E. MACIÑEIRA ^(1,2), J. FERRERAS ⁽¹⁾, F. COSTA ⁽¹⁾, F. SÁNCHEZ-TEMBLEQUE ⁽¹⁾, A. RUIZ ⁽¹⁾, F. NOYA⁽²⁾ & V. BAJO ⁽²⁾

⁽¹⁾*Water and Environmental Engineering Group (GEAMA).*

*Civil Engineering School - CITEEC, University of A Coruña, Campus de Elviña, s/n. A Coruña, 15071, Spain
(epena@udc.es)*

⁽²⁾*A Coruña Port Authority*

Abstract

After the construction of its main breakwater and the operations esplanade, the third phase of the works in Punta Langosteira harbour, in A Coruña, consisted in the construction of two parallel auxiliary breakwaters. The function of these secondary breakwaters, besides improving the protection of the harbour area, is safeguarding the water inlet of a power station close to the facilities from the longshore sediment transport. These structures are not very common due to the orientation of their longitudinal axes, which is parallel to the travel direction of the incident waves instead of being perpendicular. This configuration, far less known, led the Port Authority to find the optimal solution through a physical model study. The results of the research showed that the weakest section was found in the transition section between the quarystone and the concrete blocks armour. Furthermore it was concluded that the random allocation of the concrete amour blocks is a key factor in the behaviour of the armour layer facing the wave action, and therefore the failure mechanism is dependent of the placing procedures. With these conditioning factors the optimal design was difficult to reach.

1. Introduction

In the last two decades, growing activities in the A Coruña Port have resulted in a significant lack of space in the existing facilities. Together with the hazard and environmental impact of its main traffics consisting in petroleum and carbon, there has been an increasing demand to expand its facilities away from the city. For this reason the Port Authority decided to build a new harbour in Punta Langosteira, located ten kilometres to the west from the city centre. Currently, the two first phases -main breakwater and operations esplanade- of the project are completed.

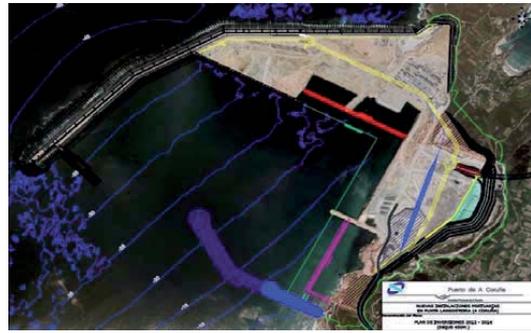


Figure 1 Punta Langosteira Port present (left) and prediction with one of the location of the new breakwaters (in blue, right)

In the third phase of the construction of Punta Langosteira harbour, two rubble mound breakwaters are being built, with their axes parallel to each other and perpendicular to the shoreline. Their lengths are 550 meters for the longest (south breakwater) with the latest 100 being submerged, and 340 meters for the shortest (north), which is also in the inner position in the harbour basin. The design was developed by the A Coruña Port Authority with the collaboration of a consultancy.

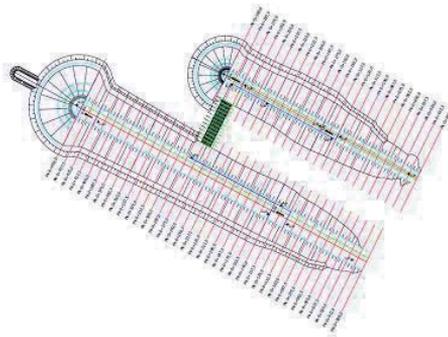


Figure 2 Initial design of the parallel breakwaters

The purpose of the construction of these groins is double. On one hand safeguarding the water inlet of a power station located near the harbour from the longshore sediment transport, and on the other hand it is expected that the port basin conditions are improved for harbouring as well.

The location of these two breakwaters so close to each other is singular and difficult to predict previously the mutual interaction between them. The orientation of the breakwater with their axes almost parallel to the main direction of the waves, is also different from typical layouts. That is why the Port Authority estimated the need for studying the problem on a physical model to analyze the behaviour of both breakwaters together to find an optimal structural design.

The final objective of this project has been to find the optimal layout design and the stability of the components of the different parts, that is:

- Find the stable sizes for the structural elements in the different parts of the breakwaters north and south: trunk sections, roundheads, toe berms and submerged jetty.
- Determine the critical stability point in both breakwaters from which the trunk can be constructed of quarrystone blocks instead of concrete blocks.

2. Experimental facilities and procedures

2.1 Experimental facilities

The experiments were conducted in the wave tank at the CITEEC (*R+D Centre in Building and Civil Engineering*, www.udc.es/citeec) of the University of A Coruña (Spain), where two and three-dimensional tests can be conducted. The wave tank is 34 m long, 32 m wide and 1.10 m deep. For this study, its width was reduced to 22 m, in order to be concordant with the chosen scale.



Figure 3 Wave tank of CITEEC and wave generation paddles

Laboratory waves were generated with five piston-type wave generators controlled by proper software capable of creating both regular and spectral waves. A dissipative beach with a parabolic profile was created at the end of the tank and in the laterals as well, preventing the reflection of transmitted and diffracted waves.

Previous studies were done in order to calibrate the wave tank, focusing on the two most important parameters: the length of the transition zone, in which the wave profile is developed from the generating paddle, and the profile for the dissipative beach with the best results on dissipation.

After the wave tank calibration, another study was performed to check if the measured shoaling at the wave tank matched the numerical wave propagation model made for this project by a consultancy. It was observed that at the end of the tank, higher waves were measured near the absorption beach compared to the numerical model.

The reason for this discrepancy was that the numerical model was calibrated with a 100% of energy dissipation on the coast, which didn't reproduce prototype conditions, and at the laboratory setup the dissipative beach does not provide this total absorption. It could be observed in prototype that the real conditions were better matched by the physical model than the numerical one, because of some small cliffs reflecting a small amount of the waves energy. In any case, the effect of the coast reflection didn't affect to the most exposed part of the structure under design. So it was concluded that the physical model matched correctly the design conditions.

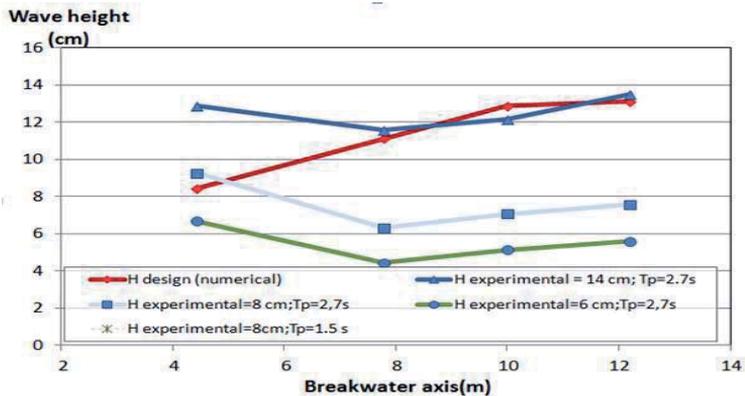


Figure 4 Numerical and experimental results for the waves

2.2 Description of the experimental breakwaters

The laboratory scale was set at 1:45, so the lengths of the two structures were 12.2m and 7.5m. With that scale we estimated the necessary width to be used in the tank to avoid diffraction from the lateral absorbing beaches. One of the main conditions for these types of studies is to accurately reproduce in the wave tank the bathymetry of the Langosteira port area surrounding the breakwaters.

This bathymetry reproduction at the wave tank was made with a special grout filler mixed with expanded polystyrene balls to reduce the total weight and a thin outer cement shell over it. The bathymetry was built from 0m to 20m depth as the following profile of the tank shows.

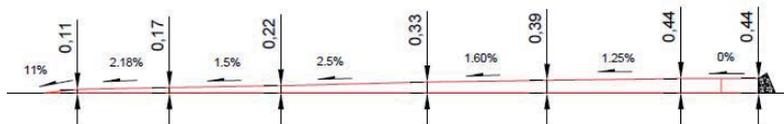


Figure 5 Langosteira bathymetry reproduction in the wave tank

The design storm waves for the breakwater were provided by the Port Authority, corresponding to a return period of 140 years with values of 5.8 meter (significant wave height) and 18 seconds (peak period), measured at the south/longest breakwater head.

Stability tests were then designed to progressively inflict damage to the breakwaters. The final solution was to generate wave tests with growing significant wave height from 4.5 until 5.8 meters, all of them with peak period of 18 seconds and a duration of 1500 waves.

Stability was analyzed in two cases, low tide to validate the toe berms, transversal and longitudinal submerged breakwaters, and high tide (4.5 meters higher) with the purpose of validate the cross sections of the trunk and the roundhead of the south and north breakwaters.

Both structures were built at the laboratory with four different materials over the inner core. For the shore ending, the armour layer is formed by 5 Ton quarry stones, and for the roundheads and the final part of the both trunks the armour layer had cubic concrete blocks of 10, 20, 35Tn.

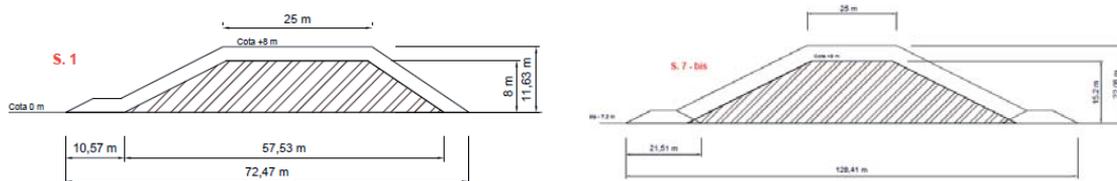


Figure 6 Sections of the two breakwaters

3. Instrumentation

Wave height measurements were made using conductivity type water level sensors located on four control points.

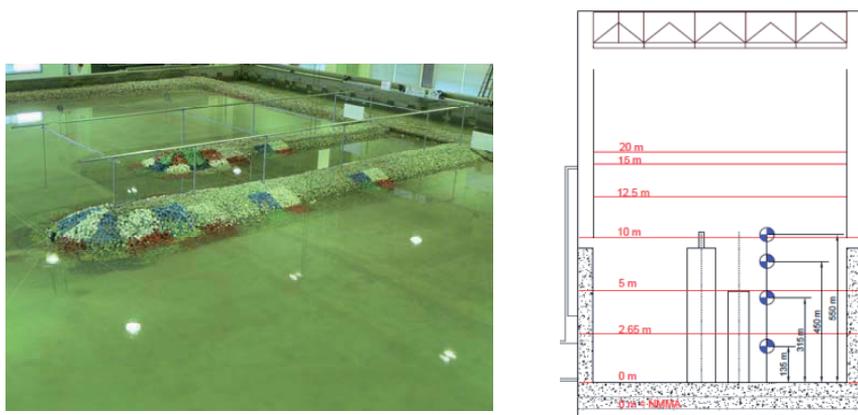


Figure 7 Breakwaters constructed (left) and level sensors (right)

The damage evaluation in the trunk sections with quarrystone armour was evaluated by means of two different methods. The first method, a qualitative one, was performed in five selected control areas by painting coloured checkerboards to directly observe rubble mound movements during the tests.



Figure 8 Coloured checkerboards

The second one was performed by measuring cross section profiles every 25 meters (at prototype scale) with a photogrammetric technique. This simple technique is based of projecting a laser sheet to illuminate the cross section profile, take an image with a digital camera and, after that, perform a calibration to correct the perspective distortion and correlate pixels and physical units as well. To perform this calibration, a pattern with an orthogonal mesh grid was included in every image.

Evaluation of the damage was then performed by comparing the cross section profiles at the images before and after every test.

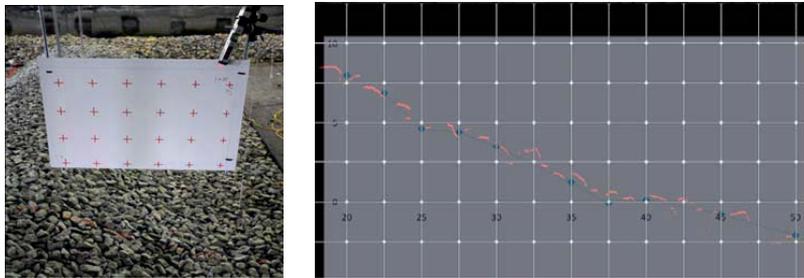


Figure 9 Quarrystone cross section profiling

The damage evaluation at the roundhead and the sections covered by concrete blocks was performed by simply counting armour units extracted from 12 different control zones. The blocks were painted with different colours, taking pictures from the very same point before and after the tests on selected locations.

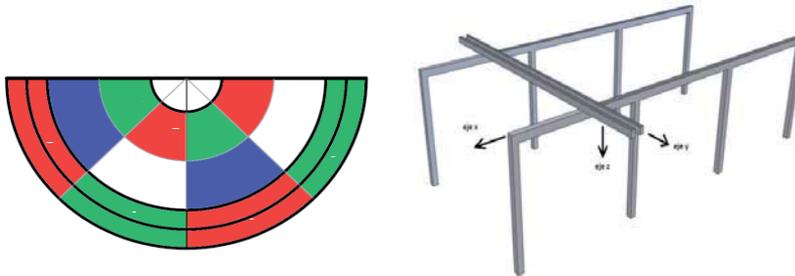


Figure 10 Coloured checkerboards in the roundhead (left) and positioning system (right)

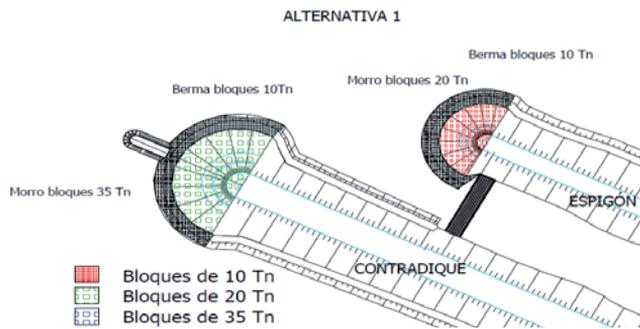
For the laser profiling system and to allow the photographs to be taken every time from the same perspective we used a positioning system very similar to bridge crane, fabricated and designed in the CITEEC, which provides to the model a coordinate reference system XYZ, facilitating the data processing and the model construction as well.

4. Optimal Analysis Design

To achieve the optimal structural design five different alternatives were tested.

4.1 Alternative 1

This first alternative had concrete blocks only in the armour layer of the roundhead of the breakwater, with the remainder of the breakwater protected by quarrystone. The armour layer of both roundheads was built with two layers of cubic concrete blocks of 10 tons in the north breakwater and 20 tons for the south breakwater.



The result of this test was a total failure in both breakwaters roundhead in the section between the blocks and the rubble mound.

The damage occurred in the outer slope of the north breakwater (10Tn blocks), and was much greater than the south one (20Tn) allowing the exposure of large areas of the core. On the other hand the toe berms and the quarrystone sections of the trunk performed well in all the test performed.

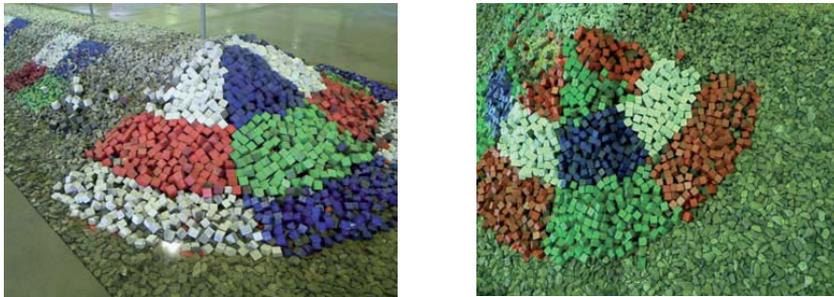


Figure 12 Fails in roundhead

4.2 Alternative 2

After the study of the failure mechanism in the previous test we proceeded to make some modifications in the breakwaters to improve the performance:

- Modification the inner slope of the south breakwater to improve the transition between the concrete blocks and rubble mound.
- Rising the roundhead blocks weight, to 20Tn (north) and 35Tn (south).
- In order to enhance the transition between the roundhead blocks and the rubble we changed to a gradual solution with the use of two intermediate sections with lighter blocks in the trunks. The length and armour weight of these transition sections was 25 meters and 20Tn and 25 meters and the 10Tn for the longest and the shortest groins, respectively.

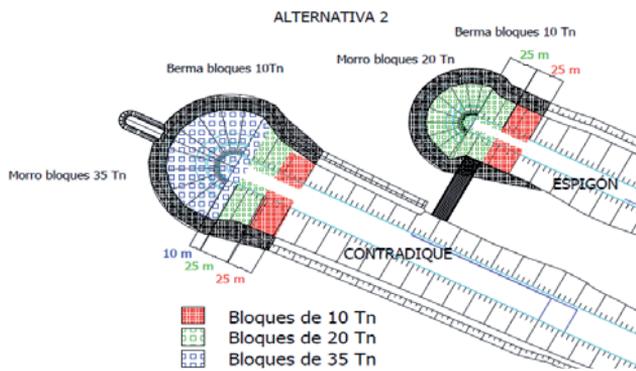


Figure 13 Alternative 2

The results of this test showed a failure mechanism in the transitions between the 10 Tn blocks and the rubble mound in both breakwaters.



Figure 14 Fail in the 10 Tn blocks

4.3 Alternative 3

Due to the failure in the transitions of 10 Tn blocks we decided to increase the block weight at this sections, as well as increasing the length of the transitions, excepting the inner slope of the north breakwater that it is more protected doing the following changes:

- Replacing the 10 Tn blocks for 20Tn in both north and south breakwaters
- Replacing the 20 Tn blocks for 35 Tn blocks in the inner slope of the south one.

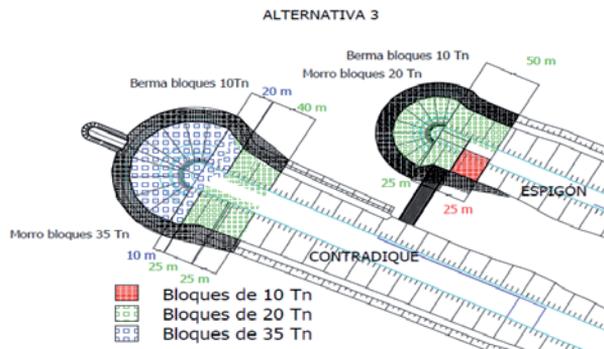


Figure 15 Alternative 3

The result of the tests this time was a failure in the outer slopes of the north and south breakwaters, being the north one the most damaged, reaching the core in the transitions zone.

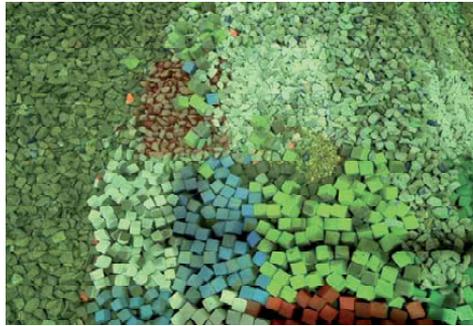


Figure 16 Fail in the outer slope of smallest/north breakwater

4.4 Alternative 4

The modifications for the 4th alternative was to increase to 35 Tn the blocks weight in the outer slope of south breakwater

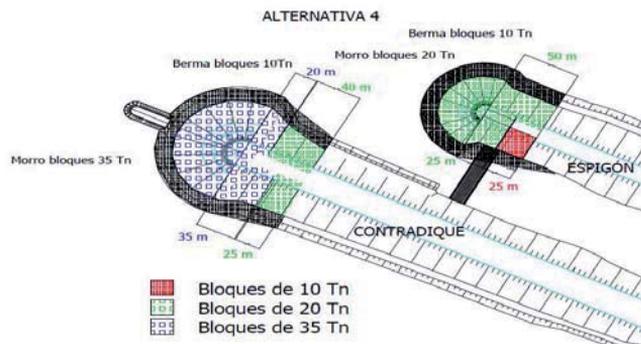


Figure 17 Alternative 4

In this test the damage was produced in the inner slope of the south breakwater and in both slopes of the north breakwater.



Figure 18 Fails in alternative 4

4.5 Alternative 5

The last alternative and the optimal structural design of the breakwaters consisted in:

- Increasing the 35Tn and 20Tn blocks sections length in the inner slope of south breakwater.
- Replacing the 10Tn blocks in the north breakwater by 20Tn units.
- Increasing the 20tn blocks section length in the outer slope of the North breakwater

This final design was tested in low and high tide conditions, each one with wave heights of 4.0, 5.0, 5.8 meters in groups of 1500 waves. After the complete test the armour movements and extraction were negligible in all sections.

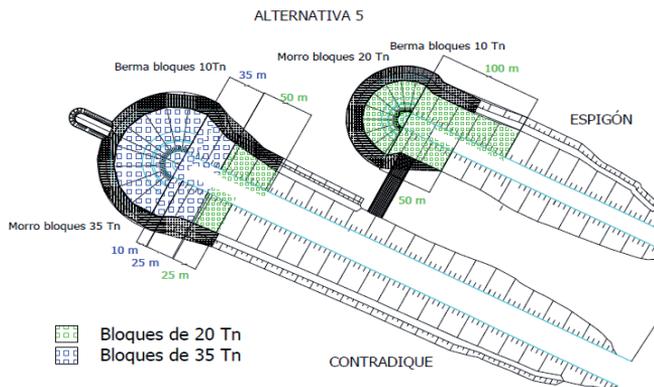


Figure 19 Alternative 5

6. Conclusions

After the tests with five alternatives of both groins design, a stable configuration was found with the following characteristics. The behaviour of the 5Tn armour was good since the beginning of the tests. Opposed to that, the 10Tn blocks behaviour was not acceptable in any test for the trunks and then dismissed, but these blocks were used in the toe berms with a good behaviour. A total of 9236 blocks were used for the final configuration: 1811 of 35tn, 3038 of 20Tn and 4387 of 10Tn.

This singular incidence of the wave to the breakwaters creates a particular hydraulic and structural behaviour that makes the transition between sections with different sizes a fragile zone, with the initial damage occurring in a section, and continuing inwards because of the loss of support in the adjacent blocks.

It was also observed that it is difficult to propose solutions to correct this failure mechanism because the phenomenon has some degree of randomness associated to the blocks placement. Exposing the face of the biggest blocks to the incident of the waves produced that this zones were a high probability zone for failure.

As a final result, we could not fully determine which the mutual interaction between both breakwaters is. It was only observed that it is possible that the reflection between both breakwaters is creating a water accumulation between them and for this reason the next wave fronts had an increasing energy causing more damage than the expected in the smallest/north breakwater.

7. References

- "Proyecto constructivo de la protección de la toma de GNF y mejora de la utilización de las infraestructuras en Punta Langosteira" Bajo, V., 2011
- "Diseño del contradique para la protección de la toma de Union Fenosa en las instalaciones de Punta Langosteira", Sopelana, J., Bajo, V., 2011
- Burcharth, H.F., Chapter 5, Fundamentals of design . In Burcharth and Hughes Coastal Engineering Manual, Part VI, Engineer manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C., 2002
- "Random Seas and design of maritime structures", Goda, Y., World Scientific, 2000

Anexo 2. Publicaciones en revistas indexadas.

Se anexan a continuación dos artículos publicados en revistas del Science Citation Index.

Autores (p.o. de firma): Enrique Peña González, Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache, Luis Pena Mosquera, Jerónimo Puertas Agudo.

Título: Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-Scanner.

Ref. revista/Libro: OPTICS AND LASER TECHNOLOGY (Q1 0.711 2013)

Clave: A Volumen: 39 Páginas, inicial: 481 final: 489 Fecha: 2007

Editorial (si libro):

Lugar de publicación: Inglaterra

Autores (p.o. de firma): Enrique Peña González, Jaime Fe Marqués, Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache, Jerónimo Puertas Agudo, Luis Cea Gómez

Título: Experimental validation of a sediment transport bidimensional numerical model using PIV and 3D Scanning technologies

Ref. revista/Libro: JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH (Q1 1.482 2013)

Clave: A Volumen: 46 Páginas, inicial: 489 final: 503 Fecha: 2008

Editorial (si libro):

Lugar de publicación: Países Bajos

Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache	Medición de superficies sumergidas con láser en un laboratorio de hidráulica.
Universidade da Coruña	Programa de Doctorado en Ingeniería Civil. Tesis Doctoral.



Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-Scanner

Enrique Peña González^{a,*}, Félix Sánchez-Tembleque Díaz-Pache^b,
Luis Pena Mosquera^a, Jerónimo Puertas Agudo^a

^aCivil Engineering School, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña, Spain

^bCITEEC, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15071 A Coruña, Spain

Received 7 March 2005; received in revised form 17 November 2005; accepted 22 November 2005

Available online 6 January 2006

Abstract

The application of laser technologies to experimental fluvial hydraulics is a relatively new field with a promising future. In the area of sediment transport, these technologies will be used here to describe the evolution of an underwater sediment bed profile. This paper presents the application of a three-dimensional laser scanner (3D-Scanner), which measures elevation through the intersection of the laser beam with the sediment surface, correcting the effect of its refraction as it enters the water. Results were compared with those obtained with a particle image velocimetry (PIV) in recording the longitudinal profile of the bed. In this way, the utility of this high-precision, continuous and non-intrusive technique has been demonstrated in fluvial hydraulic studies with sediment transport.

© 2005 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Keywords: Laser applications; Refraction; Experimental hydraulics

1. Introduction

The study of processes linked to sediment transport is one of the most complex fields in hydraulics. The lack of analytical results and the difficulty of presenting universally accepted numerical models reflect the need to make progress in the experimental field. In this sense, the breakthrough of laser technologies has led to the development of tools that may produce promising results.

The application of these technologies to the field of hydraulics, particularly with the well-known particle image velocimetry (PIV) technique, has resulted in a substantial advancement in obtaining velocity fields in real time under unsteady and non-intrusive conditions [1–3]. Although important progress has also been recorded for sediment transport parameters, the results are not as universal as in

hydrodynamic analysis [4,5]. This paper presents the application of a 3D scanner which is a high-precision, non-intrusive system that may be used to restore the underwater sediment surface in real time. The first part of the text presents an analysis of this experimental tool, known as the three dimensional laser scanner (3D-Scanner), including a detailed description of its operation and basic characteristics [6,7]. The device used here, a Polhemus FastScan [8], is able to scan the surface of an object with a laser beam, and this image is captured by two cameras for restoration.

In the second part of the text there is an analysis of the fundamental physical and mathematical principles involved in refraction, and after this a presentation of the two series of trial runs carried out to determine the feasibility of this instrument in underwater measurements with sediment transport. The first tests conducted in a hydraulic channel demonstrated the influence of the refraction upon the results. After correcting for this effect, the validity of the 3D-Scanner in recording data on a sediment surface and its evolution is demonstrated with a

*Corresponding author. Tel.: +34981 16 70 00; fax: +34981 16 71 70.

E-mail addresses: epena@udc.es (E.P. González), fsanchez@udc.es (F.S.-T. Díaz-Pache), lpena@udc.es (L.P. Mosquera), jpuertas@udc.es (J.P. Agudo).

resolution of less than 1 mm. Lastly, we present a comparison carried out during a sediment transport experiment with the measurement of the bed using PIV.

2. Operating principle

The operating principle of the 3D-Scanner is known as active triangulation. A plane of laser light is projected on to the object to be scanned. The intersection with its surface is a planar curve called the stripe. From the angle under which a camera observes this stripe, its position in space can be obtained by triangulation. One of the most striking aspects of this technique in terms of its application to the field of hydraulics is its non-intrusive nature.

2.1. Instrument and its location in the laboratory

The equipment used in this research consisted of a wand with a laser transmitter and two cameras, a unit of reference of its position in space and a computer numerical control positioning machine (CNC frame), so that it can be driven along an axis. In this way the system digitises opaque solid surfaces through laser technologies and digital imaging which restores the shape of an object even if it is moving.

The software of the program makes it possible to carry out the necessary calculations to determine the surface of the object on the basis of images taken by the cameras in real time. The contour is exported as a scatter plot in space and a set of triangles with vertexes on these points [9]. The program allows the user to select the resolution and the size of the triangles, seeking a compromise between the greatest possible precision and the computational cost of generating this mesh. Figs. 1 and 2 show the instrument and its location in the testing channel of the Hydraulics Laboratory of the Civil Engineering School.

2.2. Physical principles

The process used by the 3D-Scanner to digitise surfaces is similar to the type described as an active imaging technique and consists of two basic stages. In the first stage—acquisition—the user focuses the laser beam on the object and the system obtains information as coordinates of points. In the second stage—reconstruction—the system interprets the scatter plots and converts them into surfaces.

While the images are being captured, the intersection curve between the plane formed by the laser beam and the object surface—stripe—is observed from a specific angle by the two cameras which triangulate the position of the points on this line. We can acquire multiple, adjacent profiles by sweeping the stripe across the object, and repeat the computation for each relative position of the stripe and object.

The Fig. 3 and the equations shown below describe the basic geometry for an active triangulation, where O is the

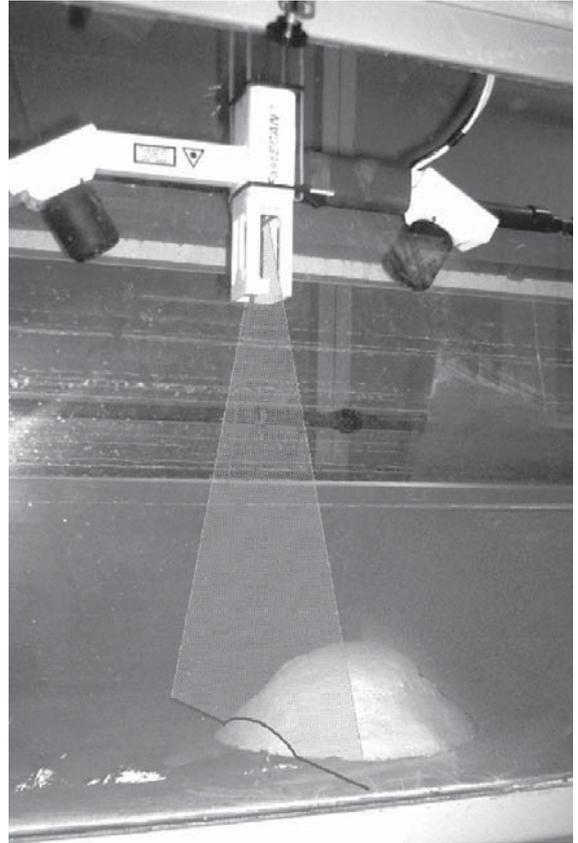


Fig. 1. Laser beam emitted by the 3D-Scanner.

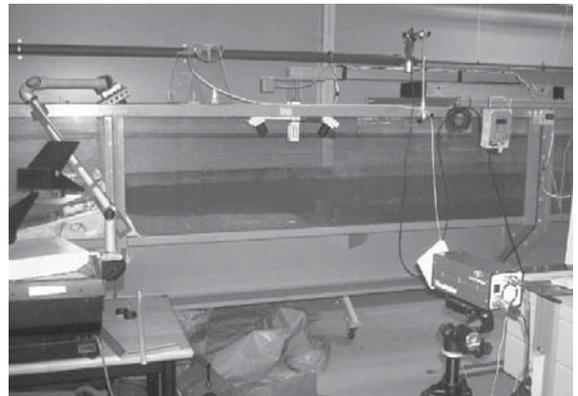


Fig. 2. Location of 3D-Scanner (instrument, reference unit and CNC frame) and PIV.

optical centre of the lens and M is the point on the surface whose coordinates are to be measured.

Heights z can be determined from the angle θ at which the camera views the projected laser beam and the distance

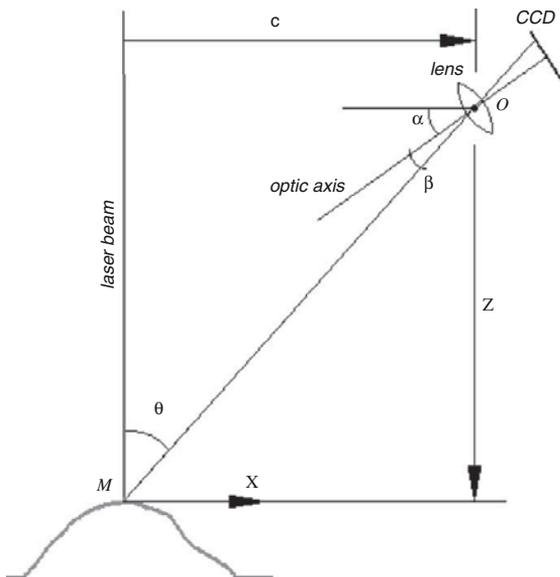


Fig. 3. Laser beam, object and variables involved.

c from the optical centre of the camera lens and the beam. This angle θ can be determined from α , a geometrical constant of the equipment, and β , measured in the image plane of the camera, as a function of its focal length.

Thus, once the distance c is known, we can write for the xz plane the following expressions:

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

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

These coordinates of points in the acquisition stage are calculated on axes (x,y,z) relative to the wand. The absolute coordinates (X,Y,Z) are obtained by means of the spatial position of this wand, which is determined through the three perpendicular electromagnetic fields being emitted by a fixed object. These fields reach a receiver located on the wand equipped with three perpendicular coils, thus using techniques for measuring distances. In the reconstruction stage, the scatter plot is transformed into a surface, exported in triangle mesh. This paper does not aim to study the acquisition and reconstruction algorithms which are described elsewhere [10,11], rather it focuses on the application of this instrument to digitise objects under the water surface.

The digitisation of a sediment surface using this laser technology must consider the effect of refraction on the measurements taken, since the incident beam is refracted when it changes from one medium into another. The angle of the refraction depends not only upon the refractive indices of the media involved but also upon the colour (wavelength) of the light. As we are working with laser

light having only one wave length, it is not necessary to take this source of error into account. Some similar type instruments operate with polychromatic light which makes the accuracy of the images taken under the water surface less reliable. Another advantage of laser light versus other light sources is its high directionality or collimation, which allows it to be projected on to objects as a very thin line.

3. Validation and calibration of the 3D-Scanner

This section offers a theoretical analysis and describes the experimental methodology followed to determine the application of the 3D-Scanner to hydraulic studies with sediment transport.

3.1. Experimental methodology

Tests were conducted at the Hydraulics Laboratory of the Civil Engineering School at the University of A Coruña. This laboratory is equipped with a hydraulic circuit and a rectangular channel with variable slope. A fundamental aspect of the channel is that some of its components are metallic, which gave rise to several problems in previous calibration tests. As discussed above, the 3D-Scanner takes measurements by means of the emission of a laser beam and by determining the position of the wand in space through electromagnetic fields. So, these measurements may be altered by the existence of other magnetic fields or materials in the surrounding area [12]. The problem of obtaining the maximum resolution with this instrument was solved by raising the receiver or reference unit onto a plexiglas base, which separates it from the steel frame of the channel and also allows to align the receiver's axis which is the system's coordinate reference.

Moreover, the extendable arm that holds the 3D-Scanner, used to scan the bottom longitudinally, was made out of wood to avoid any interaction with the metal edges. In order to ascertain the direction of the laser beam, as it enters the water, the beam was kept in a perpendicular position relative to the bottom of the channel, as shown in Fig. 2. An important part of these tests involved obtaining a regular, stable water surface, which would permit controlled refraction, and it was essential to keep the water clean at all times to attain the highest precision possible.

Measurements of the depths or elevations of the water surface—which were necessary to correct for the effect of the refraction in the laser beam—were taken with an ultrasonic level transmitter with continuous recording.

3.2. Tests on a plane bed

The first tests were designed to record the profiles of the plane bottom of the channel at different depths, to correct for the effect of refraction on the measurements obtained.

An important aspect to bear in mind in this study is that refraction affects both the entrance of the laser beam into

the water as well as the images taken by the cameras, causing a variation on two planes. In the work carried out so far, we have analysed the central line produced by the intersection of the laser beam and the surface to be measured. In this way, if the laser beam is perpendicular to the surface when it hits it, and only this central line is studied, there would not be any entrance refraction.

For the purpose of obtaining a relationship that would consider refraction, depth measurements were recorded in real time, and, at the same time, scanning was carried out with the 3D-Scanner. This made it possible to determine the relationship between the depth and bottom elevation obtained with the instrumentation. Fig. 4 includes the variables involved and a diagram of the refraction phenomenon.

Below the water surface, the angle θ_i under which the camera views the intersection of the laser beam and the channel bottom is no longer its real position, Eq. (2) is not valid anymore, and it is necessary to reformulate the problem. The trigonometric relationships to analyse the refraction through the surface between the air (incident medium) and the water (refracted medium) can be written as follows:

$$(d - y) \tan(\theta_i) + y \tan(\theta_r) = c, \tag{3}$$

$$(d - r) \tan(\theta_i) = c, \tag{4}$$

where d is the vertical distance between the optical centre of the camera and the channel bottom, y is the depth, r is the

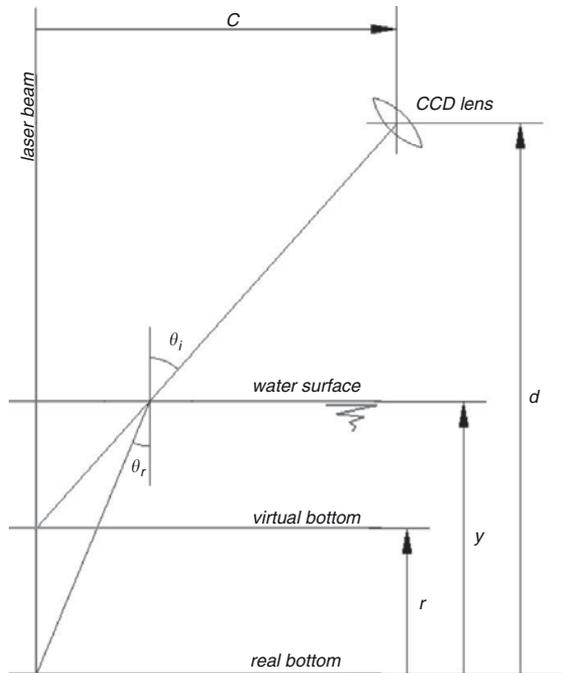


Fig. 4. Effect of refraction on a plane bottom.

virtual elevation of the bottom of the channel, θ_i is the incident angle, θ_r is the angle of refraction.

From Snell's law:

$$\sin \theta_i = \frac{n_r}{n_i} \sin \theta_r. \tag{5}$$

If we consider that the rate of refractive index between air (n_i) and water (n_r) is equal to 1.333, the Eq. (3) becomes

$$(d - y) \tan(\theta_i) + y \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{\sin(\theta_i)}{1.333}\right)\right) = c. \tag{6}$$

By introducing c and d as data, the previous equation would be solved by obtaining an incident angle for each depth. Thus, the virtual elevation r may be calculated in terms of depth.

$$r = d - \frac{c}{\tan \theta_i}. \tag{7}$$

Fig. 5 displays the plane channel bottom recorded after scanning at a depth of 71 mm.

The refraction of the laser beam causes the virtual surface observed by the instrument to elevate as predicted from its real position and bend upwards in the plane yz , and this bending grows as the water depth increases. The average

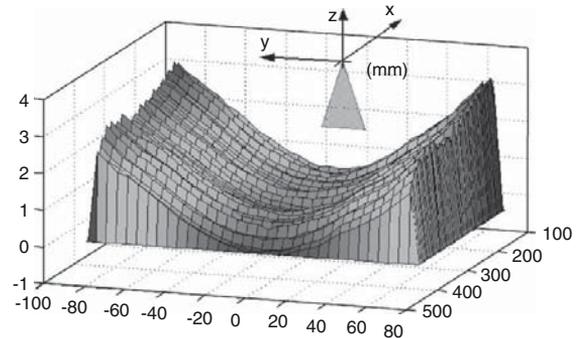


Fig. 5. Channel bottom with a depth of 71 mm.

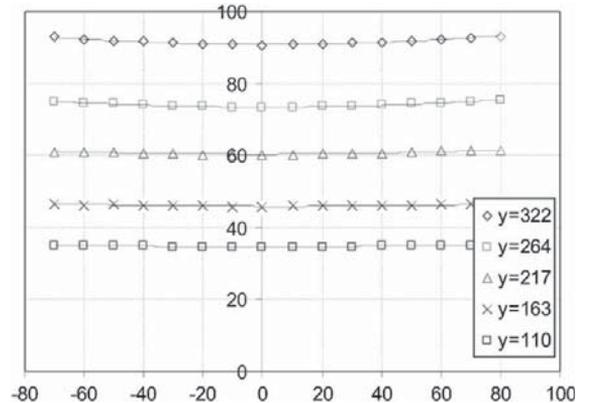


Fig. 6. Average profile in plane yz with different depths.

profile of the surface in this plane can be seen in Fig. 6 for different values of water depth, showing this effect.

3.3. Calibration of the plane bed tests

This section presents an in-depth study of the plane bed measurements. Four scans were made with different depths. Statistical analysis of these four groups of data was carried out, to ensure the repetitiveness of the results, finding them to be highly accurate. If we focus on the central line of the surface which suffers no refraction in the xy plane, we only have an elevation r from its real position. The values recorded with these four bottom scans are now presented in terms of its average, calculated and plotted for each depth y . Fig. 7 also draws a comparison with the theoretical results of elevation r relative to the depth y , from Eq. (7) for values of $c = 250$ mm and $d = 790$ mm. The theoretical relationship was adjusted with the values of the position of the optical centre of the lens (c and d), which are not provided by the manufacturer and must be estimated. In both cases the curve is linear ($r^2 = 0.99975$) in

the whole range of experimentation covered by the 3D-Scanner.

Variations r' of the measurements of the channel bottom from its average elevation value are under 0.3 mm in almost all cases, as it can be seen in Fig. 8.

Thus, we can state that the 3D-Scanner recorded a channel bottom with a very high degree of accuracy, even at a depth of 322 mm.

The conclusions drawn in this section show that the experimental methodology used is satisfactory. Firstly the theoretical study of the virtual elevations of the bottom is validated and, secondly, the profiles of this bottom are obtained with great accuracy.

3.4. Tests with a pattern on the bottom

To gain more insight into the study of refraction and how it relates to depth, in the second series of tests we introduced an irregular element as a pattern to represent its profile at different depths.

In this case the analysis aimed to relate the real existing elevation to the virtual elevation recorded, after subtracting the virtual bottom elevation obtained in the previous calibration test. The refraction diagram and the elements involved in these tests are shown in the Fig. 9.

The representative equations are now

$$(d - y) \tan(\theta_i) + (y - z_r) \tan(\theta_r) = c, \tag{8}$$

$$(d - z_m) \tan(\theta_i) = c, \tag{9}$$

$$z_v = z_m - r, \tag{10}$$

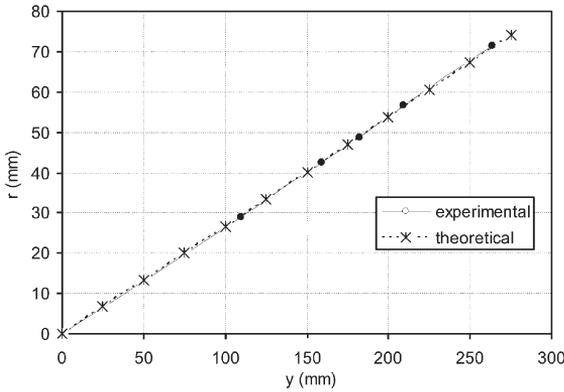


Fig. 7. Theoretical–experimental comparison of the virtual elevation of the bed and depth.

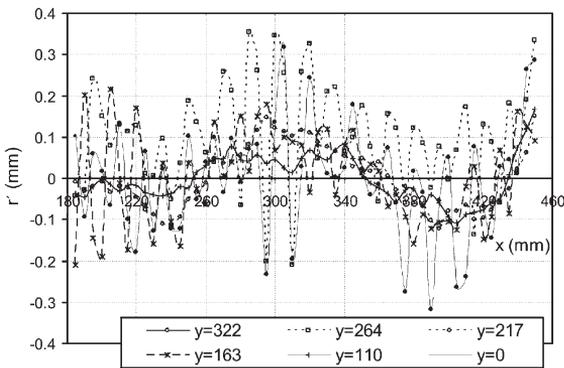


Fig. 8. Deviation of the channel bottom measurements from its average value for each depth.

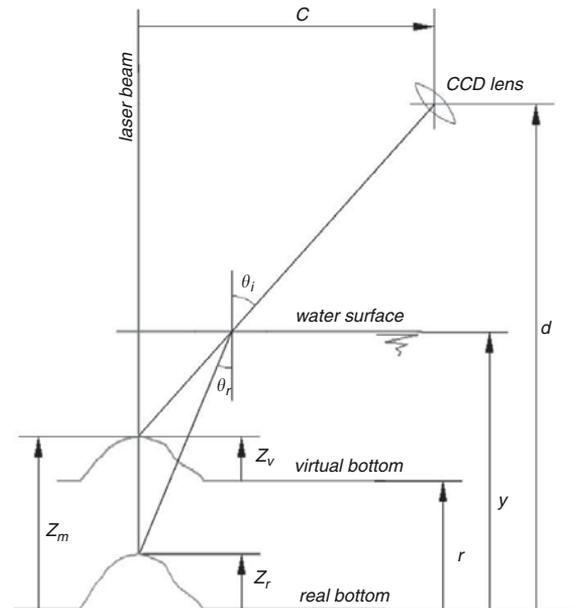


Fig. 9. Influence of refraction with the pattern.

where z_r is the real elevation, z_m is the elevation measured with the 3D-Scanner and z_v is the relative or virtual elevation after subtracting elevation r from the bed of the channel as an offset.

In Fig. 10 we present the theoretical virtual elevations with different depths. Although it is rather difficult to distinguish in the figure, the results pertaining to different depths up to 400 mm are superimposed over the points represented in the graph.

The variation of the theoretical ratio between real and virtual heights z_r/z_v with the water depth in the working range is under 5 per thousand, as can be seen in Fig. 11. The relationship obtained is almost linear ($r^2 = 0.9984$).

Fig. 12 represents the Matlab visualization of the pattern carried out with the 3D-Scanner.

Fig. 13 gives the average value of four scans, showing the measurements corresponding to three depths (Fig. 13) and includes a comparison of the existing situation without refraction.

In Fig. 14 we compare the virtual and the real elevations.

The results of the above figure confirm the theoretical relationship obtained in Fig. 10. First, it is important to notice that the distance from the bisector ($z_v = z_r$) reflects

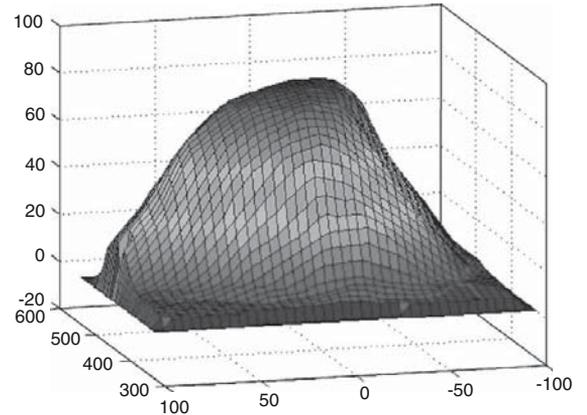


Fig. 12. Visualisation of the pattern with Matlab.

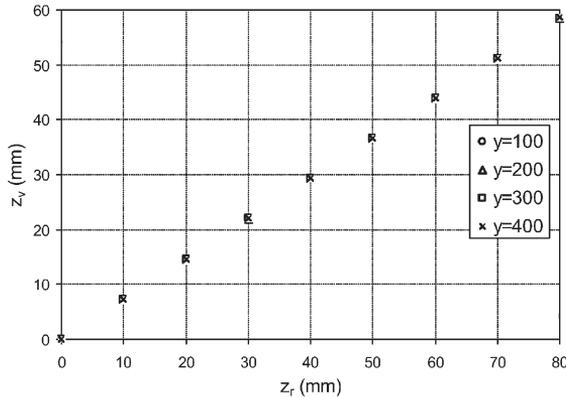


Fig. 10. Theoretical relationship between real and virtual elevation for different depths.

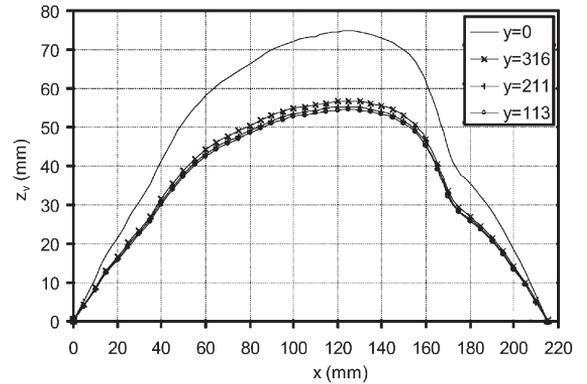


Fig. 13. Profiles of the pattern with different depths.

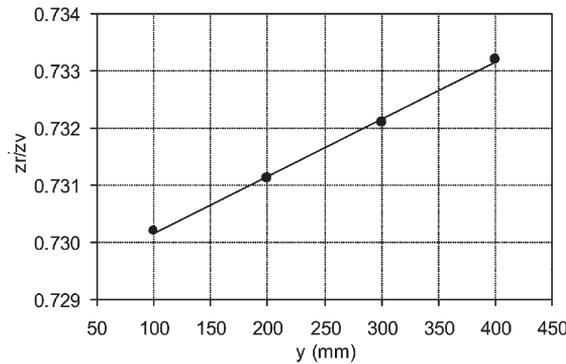


Fig. 11. Non-dimensional ratio between real and virtual heights z_r/z_v versus water depth.

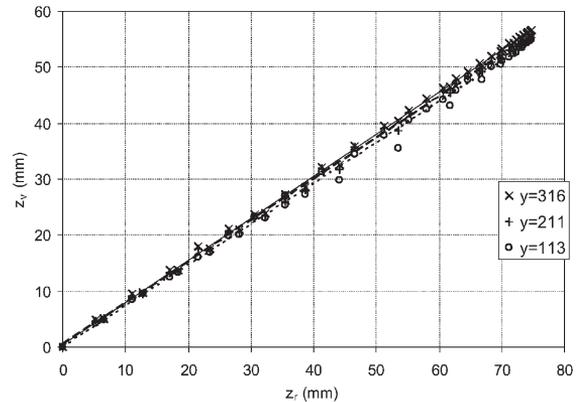


Fig. 14. Experimental relationship between real and virtual elevation.

the effect of refraction on the measurements taken. In the area corresponding to the points with the highest elevations relative to the bottom, a wealth of data has been compiled pertaining to the measurement of the upper part of the pattern analysed, on which we found a small plane surface with irregularities.

The most important result was found in the linear relationships obtained with high correlations (values of r^2 ranging from 0.9977 to 0.9992), which allows to validate, once again, the methodology followed in this study, in this case with the restoration of a pattern introduced in the channel at different water surface elevations. Moreover, the shape of the pattern and the sharp slope at some points lead to the creation of zones where the effect of the refraction and deflection relative to the vertical line is greater, which makes it difficult to obtain an accurate measurement and recording of the elevations. This effect is evident in the last graph in the interval of real elevations ranging from 40 and 55 mm, and with the lowest depth reading. In this case the water surface is affected by the presence of this pattern and it shows greater instability

which can be detected by the 3D-Scanner. This can be observed in more detail if we study the deviations of the virtual elevations corresponding to each depth relative to its regression line (Fig. 15).

As we can see, the measurement error is generally below 1 mm, except in the zone discussed above. In the analysis of the above figures, it is possible to detect some influence of depth on the measurements taken with a slight rise in the slope as the water surface elevation increases (Fig. 14). The graph in Fig. 16 details the relationship obtained from the non-dimensional analysis of the real and virtual elevations compared with depth ($r^2 = 0.9585$).

3.5. Restoration of refraction. Accuracy and noise

The previous results show the suitability of the 3D-Scanner in the reproduction of the theoretical behaviour developed. Based on this, two linear relationships were obtained among the fundamental variables of the two test series (Figs. 7 and 14).

$$r = C_1 y, \tag{11}$$

$$z_v = C_2(y)z_r. \tag{12}$$

The following relationship maintains the linear form since, while the value of C_2 depends on depth y , as can be seen in Fig. 14, it remains constant or quasi-stationary throughout the experiments. This is why it has been considered as such.

To summarise the procedure, we must point out that for a specific configuration of the instrument with a pre-set elevation from the channel bottom, calibration constants C_1 and C_2 are determined through a series of previous tests. So, for each subsequent test under unsteady conditions, the 3D-Scanner will measure the distances to the surface of the pattern, which may be converted into real elevations over the channel bottom as illustrated in the following relationship:

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_v = \frac{1}{C_2} (z_m - r) = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} y. \tag{13}$$

This research work thus shows the potential application of the 3D-Scanner in the study of the restoration of pattern surfaces, and its possible use in determining the evolution of an under-water sediment bed in real time on the central line of a laser beam emitted through an automatic, non-intrusive technique.

Moreover, the overall accuracy and resolution, in keeping with the expressions analysed in the previous section, are determined by the precision of the 3D-Scanner established at 0.5 mm, the magnitude and accuracy of the measurement of the constants, and the accuracy of the depth measurement, which also has a value equal to 0.5 mm. Constants C_1 and C_2 are obtained statistically with a correlation of around one ($r^2 = 0.9998$ for C_1 , and $r^2 = 0.9977$ for C_2), and their absolute values in the tests are 0.2694 and 0.7385, corresponding to the slopes of Figs. 7 and 14, respectively.

After carrying out an error analysis in Eq. (13), and introducing the values obtained during the calibration, we

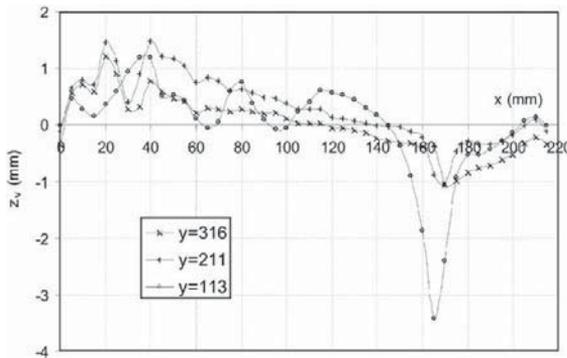


Fig. 15. Deviations of the measurements of the pattern profile relative to the regression line with different depths.

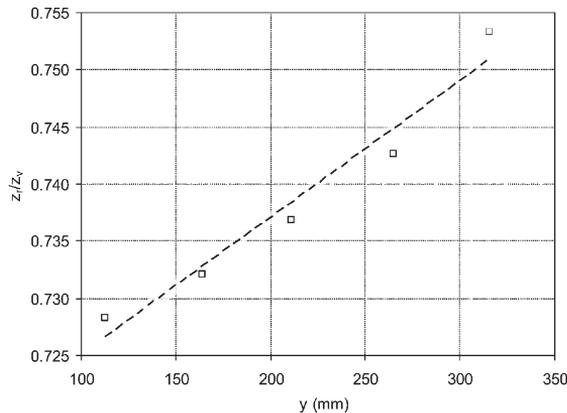


Fig. 16. Relationship between quotient of real and virtual elevations as related to depth.

arrive at the global error in the measurement of the real bottom elevations:

$$\Delta z_r = \frac{1}{C_2} \Delta z_m + \frac{C_1}{C_2} \Delta y = 1.354 \cdot \Delta z_m + 0.365 \cdot \Delta y = 0.860, \tag{14}$$

where Δz_m is the error in the 3D-Scanner measurement (0.5 mm), Δy the error in the depth measurement (0.5 mm).

4. Comparison of bed profile elevation recordings with a PIV

Sediment beds can also be illuminated by a Particle Image Velocimetry (PIV) laser, and directly measured on the image taken by its camera. This section presents a comparison of the results obtained in the bed profile readings with the 3D-Scanner and PIV. Fig. 2 illustrates the location of the instruments for joint operation. The tests for this comparison, conducted at the Hydraulics Laboratory mentioned earlier, confirmed the application of the 3D-Scanner in this study.

An important aspect to remember is the great potential of the 3D-Scanner to measure the bed elevation in 3D, providing different results from those obtained using the PIV technique. As mentioned previously, this paper only includes the results pertaining to the centre line of the laser beam, which were made to coincide with the measurement plane of the two instruments to compare the series of experimental results.

The comparative test presented here was carried out to gain insight into the bed profiles of a non-cohesive sediment bed in the vicinity of a weir. In order to do this, a layer of sand was spread out in the central part of the channel in the adjacent upstream zone of the weir. Externally, flow conditions were introduced to cause erosion until a final equilibrium profile was reached, with no addition of sediments. The flow rate was $0.031 \text{ m}^3/\text{s}$, the slope was kept horizontal and the initial thickness of the sediment layer was 0.12 m. Fig. 17 shows the bed profile recorded with the PIV technique.

With the 3D-Scanner we extracted the measurements for the centre line of the laser beam and then carried out the reverse transformation of refraction. Fig. 18 shows the comparison of the results obtained with the two instruments in the central section of the channel at different time steps.

The numerical differences were calculated using the root mean square (RMS) error of the measurements taken with the 3D-Scanner versus those taken with PIV (Table 1), by means of the following expression:

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum (z_i - z_{i\text{PIV}})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \tag{15}$$

where n is the number of measurements (number of cross sections).

The resulting values reflect the striking similarity between the findings recorded with both instruments, by sight on observing the graph itself, also showing accurately the final equilibrium profile.

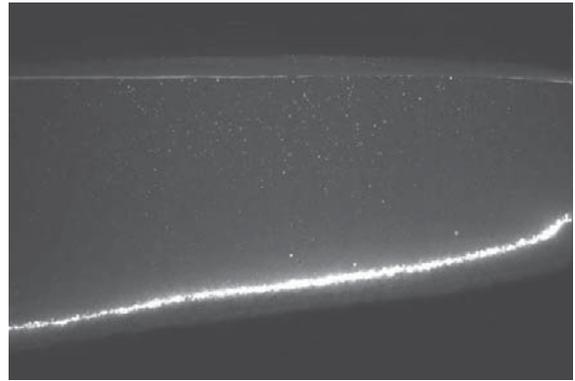


Fig. 17. Bed profile obtained with PIV.

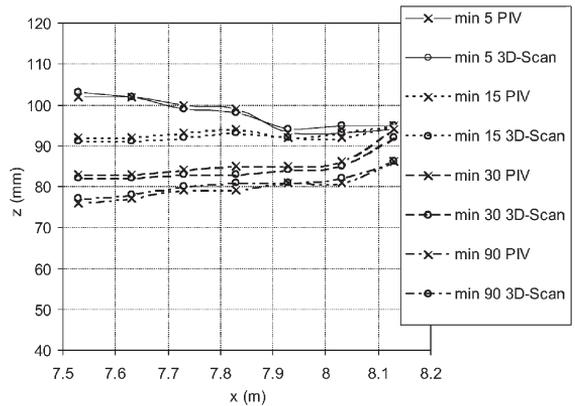


Fig. 18. Time evolution of the bed profiles. Crest of weir in Section 8.3.

Table 1
RMS error between PIV and 3D-Scanner measurements

Time (min)	RMS error (mm)
5	0.463
15	0.345
30	0.556
90	0.436

5. Conclusions

The most important conclusion reached in this paper refers to the demonstration of the ability of a three dimensional laser scanner to describe the evolution of an underwater sediment bed in real time. This instrument, known as 3D-Scanner, frequently used in virtual reality techniques, has been applied yielding good results in the measurement of the central line of a bed composed of granular material.

On the basis of the previous feasibility tests, two series of experiments were conducted with a view to quantify the effect of refraction on the incident laser beam. In the first experiment the bottom surface of a hydraulic channel with

different depths was restored and, in the second, the surface of a pattern introduced into this channel, again with different water surface elevations, was digitised. The results of this calibration point to a linear relationship between the depths and the bottom elevation measurements taken with the 3D-Scanner. A linear relationship was also obtained between the real elevations of the points of the pattern and the virtual elevations recorded. Both of these conclusions are consistent with the respective theoretical studies based on Snell's law of refraction.

The resolution attained in all the measurements was less than 1 mm, which reflects the ability of this instrument to solve sediment bed elevations accurately and non-intrusively. These results were complemented by a test carried out using sediment transport, and a comparison of the findings in this field using the PIV technique on the same measurement plane is presented. The recordings of the bed profiles with the two instruments matched. The results presented here are clearly promising, and reflect the great potential of extending this study to 3D measurement of the sediment bed, advancing in the application of laser technologies in experimental hydraulics.

Acknowledgements

The authors are grateful to the support provided by the University of A Coruña through the Research Projects presented by Training Teams in 2003 and 2004.

References

- [1] Adrian RJ. Bibliography of particle image velocimetry using imaging methods: 1917–1995. TAM report 817, UIIU-ENG-96-6004, University of Illinois, Urbana-Champaign; 1996.
- [2] Grant I. Particle image velocimetry: a review. *Proc Inst Mech Eng* 1997;211(c):55–76.
- [3] Raffel M, Willert CE, Kompenhans J. Particle image velocimetry. A practical guide. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Springer; 2000.
- [4] Puertas J, Peña E, Sánchez-Tembleque F. Experimental techniques for sediment transport using PIV and 3D scanning technologies. *Proc Int Conf Fluvial Hydraul* 2002;2:1233–7.
- [5] Peña E, Fe J, Sánchez-Tembleque F, Puertas J. A 2D numerical model using finite volume method for sediment transport in rivers. *Proc Int Conf Fluvial Hydraul* 2002;1:693–8.
- [6] McCallum B, Nixon M, Price B, Fright R. A feasibility study of hand-held laser surface scanning. *Proc Image Vision Comput NZ* 1996;103–8.
- [7] McCallum B, Nixon M, Price B, Fright R. Hand held laser scanning in practice. *Proc Image Vision Comput NZ* 1998;17–22.
- [8] Polhemus. 3Space FastScan. Hand held laser scanner user's manual, 1st ed. Vermont: Polhemus Incorporated; 2002.
- [9] Fang T, Piegl LA. Delaunay triangulation in three dimensions. *IEEE Comput Graphics Appl* 1995;15(5):62–9.
- [10] Lodha SK, Franke R. Scattered data techniques for surfaces. In: *Proceedings of Dagstuhl conference on scientific visualization*. Silver Spring, MD: IEEE Computer Society Press; 1999. p. 182–222.
- [11] Savchenko VV, Pasko AA, Okunev OG, Kunii TL. Function representation of solids reconstructed from scattered surface points and contours. *Proc Comput Graphics Forum* 1995;14(4):181–8.
- [12] Nixon M, McCallum B, Fright R, Price B. The effects of metals and interfering fields on electromagnetic trackers. Vol. 7(2). Cambridge, MA: MIT Press; 1998. p. 204–218, DOI:10.1162/105474698565587.

Experimental validation of a sediment transport two-dimensional depth-averaged numerical model using PIV and 3D Scanning technologies

Validation expérimentale d'un modèle numérique bidimensionnel de transport solide moyenné en hauteur utilisant les technologies de PIV et de balayage 3D

ENRIQUE PEÑA GONZÁLEZ, (IAHR Member), Associate Professor, PhD Civil Engineer, IAHR Member No. 8249, *Civil Engineering School, University of A Coruña, Campus de Elviña s/n, 15192 A Coruña, Spain. Tel.: +(34) 981.16.70.00; fax: +(34) 981.16.71.70; e-mail: epena@udc.es (author for correspondence)*

JAIME FE MARQUÉS, Associate Professor, PhD Civil Engineer, *Civil Engineering School, University of A Coruña, Spain*

FÉLIX SÁNCHEZ-TEMBLEQUE DÍAZ-PACHE, Mechanical Systems Engineer, *CITEEC, University of A Coruña, Spain*

JERÓNIMO PUERTAS AGUDO, (IAHR Member), Professor, PhD Civil Engineer, IAHR Member No. 7401, *Civil Engineering School, University of A Coruña, Spain*

LUIS CEA GÓMEZ, Assistant Professor, PhD Civil Engineer, *Civil Engineering School, University of A Coruña, Spain*

ABSTRACT

This paper presents the experimental validation of a two-dimensional depth-averaged numerical model with uncoupled flow and sediment transport using the finite volume method. Tests were conducted at the Civil Engineering School of the University of A Coruña (Spain), using laser technologies such as particle image velocimetry and a three-dimensional scanner (3D-Scanner). This device measures bed elevations through calculations that take refraction into account. The numerical model presented here solves shallow water equations in the hydraulic field and calculates, through well-known empirical formulas, bedload transport of uniform granular sediments. A comparison between the numerical and experimental results in the longitudinal and transversal direction, as well as in the evolution of the fundamental variables lead to the validation of the numerical model. Moreover, the application of laser technologies in fluvial hydraulics, especially with promising tools such as the 3D-scanner, here presented, is another key point of this work.

RÉSUMÉ

Cet article présente la validation expérimentale d'un modèle numérique bidimensionnel en moyenne sur la profondeur de l'écoulement et du transport de sédiment non couplés et utilisant la méthode des volumes finis. Des essais ont été effectués à l'école de génie civil de l'université de Coruña (Espagne), à l'aide des technologies laser telles que la vélocimétrie par image de particules (PIV) et un module de balayage tridimensionnel (3D-Scanner). Ce dispositif mesure des profondeurs de lit en tenant compte de la réfraction. Le modèle numérique présenté résout les équations hydrauliques en eau peu profonde et calcule, par des formules empiriques bien connues, le transport de fond des sédiments granulaires uniformes. Une comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux des variables fondamentales, dans les directions longitudinales et transversales, et dans le temps, confirment la validation du modèle numérique. Par ailleurs, la présentation des technologies laser en hydraulique fluviale qui ont été appliquées, particulièrement avec les outils prometteurs, tels que le Scanner-3D, est un autre point clé de ce travail.

Keywords: Sediment transport, two-dimensional models, lasers, model verification, laboratory tests, bed load movement, finite volume method.

1 Introduction

The study of phenomena related to sediment transport, as an essential part of fluvial hydraulics is of great importance in civil engineering. While laboratory experiments in this field have a long tradition and much research has been carried out, the appearance of new technologies and tools has led the way towards greater precision and capabilities. Moreover, numerical models are being applied more and more frequently in the field of

hydraulics, which has made it possible to plan and conduct studies on increasingly broader temporal and spatial scales.

Therefore the joint development of experimental and numerical research enables investigators to validate these numerical models, on the one hand, and to advance in the application of new instruments in the laboratory, on the other.

Experimental investigation on hydraulic models that include sediment transport require techniques for obtaining accurate measurements of the bed topography. A number of techniques are

available for measuring bed elevation in both field and laboratory scale. Flume models typically require much smaller spatial resolution. Current available techniques include touch sensors, stereo photography (Hancock and Willgoose, 2001), infrared beams (Richards and Robert, 1986), ultrasonic depth profilers (Best and Ashworth, 1994), light attenuation techniques (Munro and Dalziel, 2005), light photocells (Ballio and Raadice, 2003), electrical field attenuation (Rooij *et al.*, 1999) and laser three-dimensional (3D)-scanning devices.

All of them are subject to several limitations. Ultrasonic depth profilers, touch sensors and other submerged probes involve very intrusive techniques on a small scale model. Stereo photography and light attenuation are affected by the shadows and the changing water transparency. Electrical field attenuation is limited to very controlled conditions of temperature, salinity and to sediment with fairly narrow size distribution. Infrared beams and light photocells only allow the measurement of point data and require a long time to scan a surface, precluding their use for non-stationary studies.

Laser 3D-scanning devices avoid many of the related problems by the introduction of a controlled light source and robust imaging techniques. The underwater use of these instruments (Delft Hydraulics Facilities) can be intrusive, so in this work it was applied above the surface, and results were corrected for the effects of refraction. For this purpose a commercial system (McCallum *et al.*, 1996) was adapted to a non-conventional use.

The same principle of a laser sheet projected onto the sediment bed and observed by a camera can also be seen on the images taken by a particle image velocimetry (PIV) system (Raffel *et al.*, 1998; Adrian *et al.* 2005). The basis of PIV is as simple as to seed the flow with tracer particles, illuminate them twice with a laser sheet and look for the particles in two images taken by a hi-speed camera. Correlation of the position of the tracers in both images and the time elapsed between them yields the classic equation of space divided by time. The study of the statistical properties of the velocity fields in turbulent conditions (Adrian *et al.*, 2000) and new methods for post-processing the data employing fluid dynamical constraints (Afanasyev and Demirov, 2005) have produced very useful data for validating numerical models of sediment transport relating turbulence. Some enhancements in the technique to improve resolution on the boundary layer (Ahmed and Sato, 2001; Hendriks *et al.*, 2004) also allow the detailed study of the shear stress, an important parameter affecting the sediment transport processes. In some cases, these studies have been focused in coastal environments (Meselhe *et al.*, 1998).

The behaviour of a fluid in 3D is described by the Navier-Stokes equations, a hyperbolic set of non-linear conservation laws. They are an hyperbolic system of non-linear conservation laws. Their complexity has led to the development of the shallow water equations (see Chaudhry, 1993). This set of equations is suitable to describe the fluid behaviour in domains with a small ratio between the depth (h) and the horizontal dimensions (L), where the main movement of the particles happens in two dimensions. It is not easy to establish an exact maximum for the ratio

h/L to consider a flow shallow but $1/20$ is usually taken as a reference.

Use of the shallow water equations has increased dramatically during the last few decades. In the field of the finite volume method, they have been used by Alcrudo and García-Navarro (1993), Anastasiou and Chan (1997), Mingham and Causon (1998), Vázquez-Cendón (1999) and Wu *et al.* (2000). A good description of the method can be seen in Versteeg *et al.* (1995).

Among the many problems that can be solved with the shallow water equations are: flow in channels and rivers, tidal flows, ocean currents, shock waves, etc. One simplification of the shallow water equations consists of taking the depth average of the horizontal velocity components and neglecting the vertical one; another simplification assumes negligible bed slope. This implies that the equations are not suitable for problems in which the vertical velocity is not negligible, due to a sharp front or a steep slope. However, very good results can be achieved, even if some of the hypotheses are violated (e.g. Brufau *et al.*, 2002; Caleffi *et al.*, 2003; Cea *et al.*, 2004).

Many numerical models have appeared in the last few years, using a hydraulic depth-averaged model and empirical formulas to calculate the sediment transport in different environments (Van Rijn, 1993). Recent work is focused on the development of 3D models (Wu *et al.*, 2000; Wormleaton and Ewunetu, 2006), but there is still much to be learned about the validation of two-dimensional models, especially regarding validation using non-intrusive techniques, such as laser devices.

This paper presents the use of laser technologies to experimentally validate a two-dimensional numerical model that consists of uncoupled fluid and sediment equations, or hydrodynamic and morphological blocks. The morphological subroutines solve the sediment continuity equation by implementing different empirical formulas to calculate the bedload transport. In the two model blocks, upwind schemes were used, which are common when employing the finite volume method (Bermúdez *et al.*, 1998).

The main conclusions drawn are the validation itself and the experimental methodology, including the application of new laser technologies in the validation of the numerical model. Thus, the use of the 3D-scanner has been found to be a very valuable tool to measure the sediment bed (Peña *et al.*, 2006). The experimental validation begins with a detailed description of the methodology and follows with the comparison of the experimental and numerical results.

2 Fundamental equations

In this section the fundamental equations governing hydrodynamics in two dimensions and granular sediment transport are presented. The subsequent addition of these equations, by means of the finite volume method, has made it possible to gain knowledge of the two-dimensional field in unsteady conditions, in plane view, of velocities, depths, sediment bed evolution and solid transport in the selected domain.

2.1 Hydrodynamic equations

The expressions used to characterize two-dimensional hydraulic flow are the shallow water equations obtained from the Navier–Stokes equations given as follows:

Continuity equation:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

Dynamic equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} &= gh \left(S_{0x} - \frac{\partial h}{\partial x} \right) - gh S_{fx} \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial huv}{\partial x} &= gh \left(S_{0y} - \frac{\partial h}{\partial y} \right) - gh S_{fy} \end{aligned} \tag{2}$$

The friction slopes are related to the velocity field by means of empirical formulas, in this case using the one that introduces the Manning coefficient.

2.2 Sediment transport equations

The numerical model proposed here is a two-dimensional model to calculate the bedload transport of granular sediment. The fundamental equations related to this field are the sediment continuity equation and the empirical expressions of solid discharge. The sediment continuity equation was originally formulated by Exner, although here we have included Garcia’s expression (García, 1999):

$$(1 - \rho_0) \frac{\partial Z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + w_s(E_s - c_b) = 0 \tag{3}$$

The sediment transport formulas introduced into the numerical model—which are the ones used in the experimental validation—are detailed below. This validation is adjusted to the following characteristics: predominance of bedload transport, median sediment size roughly 1 mm, geometric slopes under one per thousand and liquid discharges of less than 0.1 m³/s. The accuracy and applicability of these equations are detailed in published works, such as Williams and Julien (1989), Yang and Wan (1991), Raudkivi (1998) and Chien and Wan (1999):

(a) Meyer-Peter and Müller (1948):

$$\frac{q_b}{\sqrt{(G - 1)gd_i^3}} = 8(\tau_b^* - \tau_c^*)^{1.5} \tag{4}$$

(b) Einstein (1950):

$$\begin{aligned} q_b &= w_s d_i 2.15 \left(e^{\frac{-0.391}{\tau_b^*}} \right) \quad \text{if } \tau_b^* < 0.18 \\ q_b &= w_s d_i 40(\tau_b^*)^3 \quad \text{if } 0.18\tau_b^* < 0.52 \\ q_b &= w_s d_i 15(\tau_b^*)^{1.5} \quad \text{if } \tau_b^* < 0.52 \end{aligned} \tag{5}$$

(c) Nielsen (1992):

$$\begin{aligned} q_b &= \left(\frac{12\tau_b}{\rho(G - 1)gd_i} - 0.05 \right) \\ &\times \sqrt{\frac{\tau_b}{\rho(G - 1)gd_i}} \sqrt{(G - 1)gd_i^3} \end{aligned} \tag{6}$$

(d) Van Rijn (1993):

$$\begin{aligned} q_b &= 0.053(G - 1)^{0.5} g^{0.5} d_i^{1.5} d_*^{-0.3} \tau_{ef}^{*2.1} \quad \text{if } \tau_{ef}^* < 0.3 \\ q_b &= 0.1(G - 1)^{0.5} g^{0.5} d_i^{1.5} d_*^{-0.3} \tau_{ef}^{*1.5} \quad \text{if } \tau_{ef}^* > 0.3 \end{aligned}$$

3 Two-dimensional numerical model

This section presents the two-dimensional numerical model proposed to solve the fundamental equations outlined above, using the finite volume method. The model itself is not the main topic of this paper, but some information about it is provided to show its reliability.

To apply this method, we have started from a prior discretization of the domain in triangles for the purpose of calculating the solution in a series of nodes resulting from such a division. The definition of the finite volumes based on these triangles may be arrived at in different ways. Here we used the ones known as cell vertex which are obtained by making the nodes of the finite volume mesh coincide with the vertices of the previous triangle mesh (Godlewski and Raviart, 1996). Around each vertex, named *I*, cells are constructed, so that the boundary of cell *C_i* is obtained by joining the centres of the triangles having *I* as the vertex with the mean points of the edges coinciding at *I*. The final nodes in which the fundamental equations will be solved are thus representative of a specific finite volume which surrounds it.

This method of obtaining finite volumes (Fig. 1) has given good results in earlier investigations by the research team to which the authors of this paper belong (Peña *et al.*, 2002).

3.1 Resolution of the shallow water equations

The methodology involved in calculating through the finite volume method is presented below, first applied to the shallow water equations. These equations allow us to obtain the depth and the two components of the velocity vector in plane view, as presented here in conservative form:

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \nabla \cdot (w) = G(x, y, w) \quad (x, y) \in \Omega \subset \mathbb{R}^2 \tag{7}$$

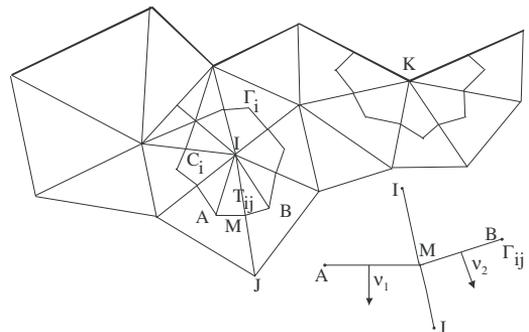


Figure 1 Construction of the finite volumes

where:

$$w = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \nabla \mathfrak{S} = \frac{\partial F_1}{\partial x} + \frac{\partial F_2}{\partial y}$$

$$\mathfrak{S}(w) = (F_1(w), F_2(w))^T$$

$$F_1 = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \\ huv \end{pmatrix} \quad F_2 = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hu^2 + \frac{1}{2}gh^2 \end{pmatrix}$$

$$G = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix}$$

To resolve Eq. (7) the finite volume method is presented and then developed. First, we divide the domain Ω into a set of finite volumes C_i and integrate over them. The exact solution is arrived at by means of values W^n , which are constant for each cell and time step ($t_n = n \cdot \Delta t$). The discretization of the time variable is carried out according to forward Euler's method:

$$\iint_{C_i} \frac{\partial w}{\partial t} dA \approx \frac{W^{n+1} - W^n}{\Delta t} A_i \tag{8}$$

We apply the divergence theorem to the second addend of expression (Eq. (7)), called flux term, converting the surface integral into a boundary integral over Γ_i , boundary of cell C_i . Moreover, if we decompose the integral in the contour as the sum of the integrals over the edges, the result would be:

$$\int_{\Gamma_i} \mathfrak{S}(W^n(x, y)) \cdot \bar{\eta}_{ij} dl = \sum_{j \in K_i} \int \mathfrak{S}(W^n) \cdot \bar{\eta}_{ij} dl \tag{9}$$

where $\bar{\eta}_{ij}$ is the normal vector outwards of edge Γ_{ij} (i referring to the analysed node, j to the opposite one), dl is the length differential of the contour of the cell and K_i the set of nodes adjacent to node i .

This term was developed by using a first-order upwind scheme. The term upwind refers to the fact that spatial discretization uses the values of the variables of the points where the information originates, thus guaranteeing the absence of fluctuations and the convergence of the solution. Centred schemes were not used, as they are considered to be unstable. The upwind schemes, however, have been clearly recommended for use in this type of analysis (Toro, 1997). Lastly, we developed the above term by means of a function $\phi(W_i^n, W_j^n, \bar{\eta}_{ij})$ called discrete flux, as presented below:

$$\int_{\Gamma_{ij}} \mathfrak{S}(W^n(x, y)) \cdot \bar{\eta}_{ij} dl \approx \bar{\eta}_{ij} \parallel \phi(W_i^n, W_j^n, \bar{\eta}_{ij}) \tag{10}$$

Several methods may be used to define discrete flux function. In this numerical model Van Leer's Q -schemes have been used (Harten et al., 1983), in the form presented in Bermúdez et al. (1998). These schemes contain a centred term as well as another term which contributes with an upwinding that ensures the convergence of the model. To avoid this term being cancelled out, and convergence lost, the regularization of the eigenvalues proposed by Harten (1984) has been carried out.

The third addend of Eq. (7) corresponds to the source term. For this addend, the interest of upwinding has been analysed by LeVeque and Yee (1990) and Vázquez-Cendón (1999), among others. In this case it is approached through a discrete source function defined as follows:

$$\iint_{C_i} G(x, y, W^n(x, y)) dA$$

$$= \sum_{j \in K_i} \iint_{T_{ij}} G(x, y, W^n) dx dy$$

$$= \sum_{j \in K_i} A_{T_{ij}} \Psi_{ij}^n \tag{11}$$

where T_{ij} are the sub-cells into which each finite volume is divided, $A_{T_{ij}}$ is the area of each sub-cell T_{ij} and Ψ_{ij}^n is the discrete source function.

The paper presented by García-Navarro and Vázquez-Cendón (2000) recommends the use of a discrete source function with two terms: one that takes into account the geometric slope between each node and those surrounding it, and another one called the friction term.

In the application of the boundary conditions for the discrete flux function, we assume that the value in the opposite node is the same as in the boundary node, which is equivalent to not upwinding the flux. In the source term, as the edges have a null area, the contributions from the boundary were not considered for this term.

Finally, we obtained the vector of the variables at instant t_{n+1} through a forward discretization in the time variable and two other off-centred spatial discretizations for the terms flux and source, evaluated at instant t_n . In this way Eq. (7) is reduced to:

$$W^{n+1} = W^n + \frac{\Delta t}{A_i} \left(\sum_{j \in K_i} A_{T_{ij}} \psi_{ij}^n - \sum_{j \in K_i} \bar{\eta}_{ij} \parallel \phi_{ij} \right) \tag{12}$$

The above equation provides an explicit iterative method over time, making it possible to calculate the depth and flow per unit width in two dimensions along all the points of the domain, based on the values shown in the previous instant, in the same node i and in nodes J which surround it ($J \in K_i$).

3.2 Resolution of the sediment transport equations

The two-dimensional model that evaluates sediment transport works in conjunction with the hydrodynamic block, although uncoupled from it. The domain in which the fundamental equations are resolved, after being previously discretized into triangles and later into finite volumes, is exactly the same in both cases.

The morphological part of the model uses the hydrodynamics obtained previously, thus making it possible to know the depth and the two horizontal components in plane view of the velocity vector. With these data we are able to calculate the sediment bed variation in the domain nodes and the sediment volumes exchanged between some finite volumes and others. The sediment is granular and uniform at all points.

The finite volume method is used to integrate the sediment continuity equation by first multiplying the terms by the area of

each finite volume. Assuming the porosity to be constant, applying Euler's method for time discretization and the divergence theorem to the second addend, the following is reached:

$$(1 - p_0) \frac{Z_b^{n+1} - Z_b^n}{\Delta t} A_i + \int_{\Gamma_i} \bar{q}_b \cdot \bar{d}l + (w_s \cdot (E_s - c_b)) \cdot A_i = 0 \quad (13)$$

The integral of the line is developed as an addend along the boundary, calculating the contributions from each side by using the sub-totals of the solid discharges of the node analysed and those surrounding it. In this part of the numerical model upwind schemes are also implemented. The final expression for the calculation of the sediment bed elevation is as follows:

$$Z_b^{n+1} = Z_b^n - \frac{\Delta t}{(1 - p_0)} \left[\left(\frac{\sum_{\Gamma_i} \bar{q}_b \cdot \bar{d}l}{A_i} \right) + (w_s \cdot (E_s - c_b)) \right] \quad (14)$$

The formulations of the solid discharge have been introduced into this block of the numerical model, which allowed us to choose between the four options presented previously. Here we may also remark that the previous equation provides an explicit iterative method in time, which has enabled us to obtain the value of the sediment bed evolution at each node I , on the basis of the values of the variables at the previous instant of each node and those surrounding it.

3.3 Coupling of both model blocks

The numerical model presented consists of several subprogrammes through which the domain, original conditions and boundary conditions are defined. Other parameters that should be introduced are porosity, median sediment size, the maximum erosion levels at each node and the bedload transport formula to be used. The maximum run time is provided externally, although the programme stops the calculation if a dynamic equilibrium is reached between the hydrodynamic conditions and the morphology of the domain, that is to say when there is no erosion from or deposition on the sediment bed (i.e. the existing shear stress is smaller than critical shear stress).

One of the main advantages of the numerical model is its ability to facilitate the interaction between the two blocks quickly and simply within the same code. The run process of the model and the coupling between the two parts of the model is as follows. Initially, the depth and the two components of the velocity vector are obtained until convergence is reached in these variables (10^{-6} m for depth, 10^{-6} m/s for velocities). Then the values obtained are transferred to the morphological block.

In the morphological block, sediment transport is calculated at all the points of the domain until one of the nodes reaches a significant variation in the elevation of the bed (i.e. three times greater than the median sediment size). This datum may be easily modified by the user in the main code. Once this value has been reached, the model returns to the hydrodynamic block to recalculate the depth and velocity. Once again, at this point, when convergence has been reached in the hydraulic part, it returns

to the morphological block, and so on. This process may go on indefinitely if the conditions are appropriate, or it may, on the other hand, halt at a particular instant. In any case, a maximum bed erosion height may be defined by the user.

The general stability of the model has been introduced using Courant condition. In the numerical model put forth here, two possibilities were raised to analyse convergence, both based on the existing velocities but using different geometric variables.

The first method carries out a search for the minimum time interval which would be compatible with stability at all points and finite volumes of the domain by means of the distance between these points. The second method uses the quotient between the area and perimeter of each finite volume, as shown in the following formula:

$$\Delta t = \min \left(\frac{A_i}{P_e \cdot (V + c_w)} \right) \quad (15)$$

This second method has been applied to obtain the necessary convergence. This time interval, which fulfils Courant condition, is used on both the hydrodynamic and morphological block of the numerical model.

4 Experimental tools: Application of the 3D-Scanner

The evolution of the sediment bed was recorded with a 3D-laser scanner, which has yielded excellent results to date in the sediment transport field in the mid-plane of the laser beam emitted.

The operating principle of this 3D-scanner is known as active triangulation. A plane of laser light is projected on to the object to be scanned. The intersection with its surface is a planar curve called the stripe. From the angle under which a camera observes this stripe, its position in space can be obtained by triangulation. We can acquire multiple, adjacent profiles by sweeping the stripe across the object, and repeat the computation for each relative position of the stripe and object. One of the most striking aspects of this technique in terms of its application to the field of hydraulics is its non-intrusive nature.

The equipment used (Fig. 2) in this research consisted of a wand with a laser transmitter and two cameras, a unit of reference of its position in space and a computer numerical control positioning machine (CNC frame), so that it can be driven along an axis.

The equipment was installed in the 15-m long channel of the Hydraulics Laboratory of the Civil Engineering School of the University of A Coruña (Spain), and measured bed elevation within a 0.5×0.5 m² section (Fig. 3).

Figure 4 and the equations shown below describe the basic geometry for an active triangulation, where O is the optical centre of the lens and M is the point on the surface whose coordinates are to be measured.

Heights z can be determined from the angle θ at which the camera views the projected laser beam and the distance c from the optical centre of the camera lens and the beam. This angle θ can be determined from α , a geometrical constant of the equipment,

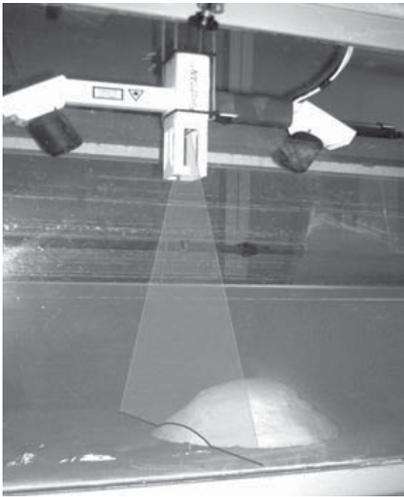


Figure 2 Laser beam emitted by the 3D-scanner

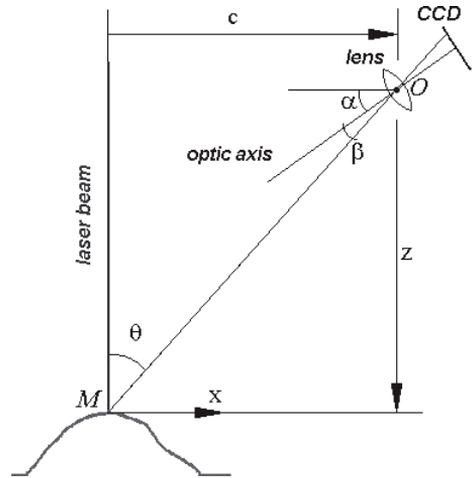


Figure 4 Laser beam, object and variables involved

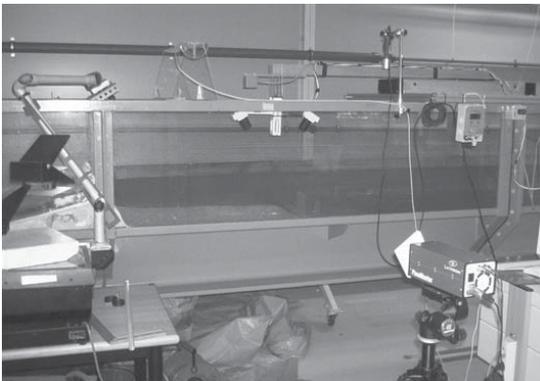


Figure 3 Location of 3D-scanner (instrument, reference unit and CNC frame) and PIV

and β measured in the image plane of the camera, as a function of its focal length.

Thus, once the distance c is known, we can write for the xz plane the following expressions:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \alpha - \beta \tag{16}$$

$$z = \frac{c}{\tan \theta} \tag{17}$$

These coordinates of points in the acquisition stage are calculated on axes (x, y, z) relative to the wand. The absolute coordinates (X, Y, Z) are obtained by means of the spatial position of this wand. A fixed object acting as a reference emits three electromagnetic (ECM) fields through three perpendicular coils. A receptor fixed to the wand has also three perpendicular coils. By means of the intensity flowing through these coils, the position of the wand is determined. The resulting digitized sediment surface measurements must be corrected because the incident and reflected rays are refracted when they pass from air to water and vice versa.

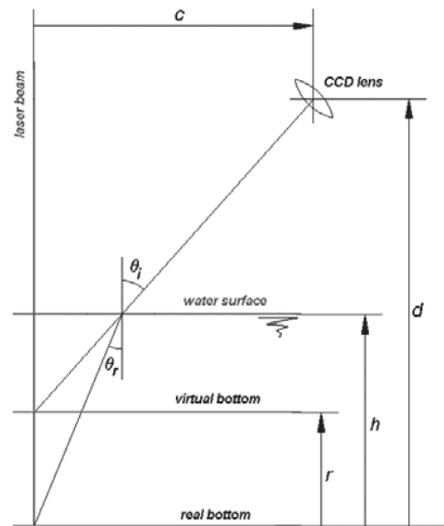


Figure 5 Effect of refraction on a plane bottom

4.1 Plane bed tests

The initial series of tests were developed to estimate the effect of refraction on the measurements of the plane bottom profiles of the channel at different depths.

The objective was to obtain a relationship between the depth and bottom elevation, recording in real-time depths and scanning with the 3D-scanner. Figure 5 shows a diagram of the variables involved in the refraction process.

The incident angle under which the camera views the intersection of the laser beam and the channel bottom is no longer θ_i , changing to the angle of refraction θ_r .

The relations of the variables of Fig. 5 are as follows:

$$(d - h) \cdot \tan(\theta_i) + h \cdot \tan(\theta_r) = c \tag{18}$$

$$(d - r) \cdot \tan(\theta_r) = c \tag{19}$$

where d is the vertical distance between the optical centre of the camera and the channel bottom, h is the depth, r is the virtual elevation of the bottom of the channel.

Introducing a value of 1.333 as the rate of refractive index between air (n_i) and water (n_r), Eq. (18) becomes:

$$(d - h) \cdot \tan(\theta_i) + h \cdot \tan\left(\sin^{-1}\left(\frac{\sin(\theta_i)}{1.333}\right)\right) = c \quad (20)$$

The virtual elevation r can be calculated now in terms of an incident angle for each depth with known values of c and d :

$$r = d - \frac{c}{\tan \theta_i} \quad (21)$$

The analysis was focused on the central line of the surface which suffers no refraction in the xy plane. Four scans of channel bottom were made with different depths and statistical analysis was carried out. Figure 6 shows the results of elevation r calculated and plotted for each depth h , of these four bottom scans in terms of its average. Figure 6 also includes the comparison of experimental and theoretical results, from Eqs. (20) and (21) for values of $c = 250$ mm and $d = 790$ mm.

The values of the position of the optical centre of the lens (c and d) were estimated from the manufacturer's specifications. The results show a linear curve ($r^2 = 0.99975$) in the whole range of experimentation covered by the 3D-scanner.

4.2 Tests with an irregular pattern

To gain more insight into the study of refraction and how it relates to depth, in the second series of tests we introduced an irregular element as a pattern to represent its profile at different depths.

In this case the analysis aimed to relate the real existing elevation (z_r) to the virtual elevation recorded after subtracting the virtual bottom elevation obtained in the previous calibration test (z_v). The refraction diagram and the elements involved in these tests are shown in Fig. 7.

The representative equations are now:

$$(d - h) \cdot \tan(\theta_i) + (h - z_r) \cdot \tan(\theta_r) = c \quad (22)$$

$$(d - z_m) \cdot \tan(\theta_i) = c \quad (23)$$

$$z_v = z_m - r \quad (24)$$

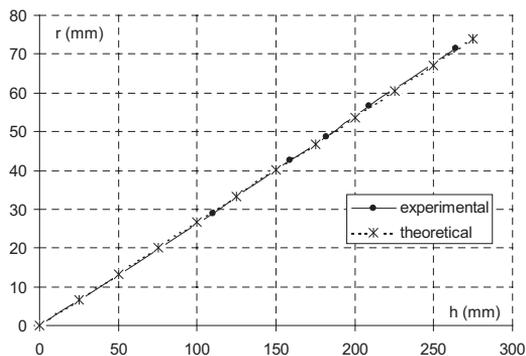


Figure 6 Theoretical-experimental comparison of the virtual elevation of the bed and depth. Plane bed test

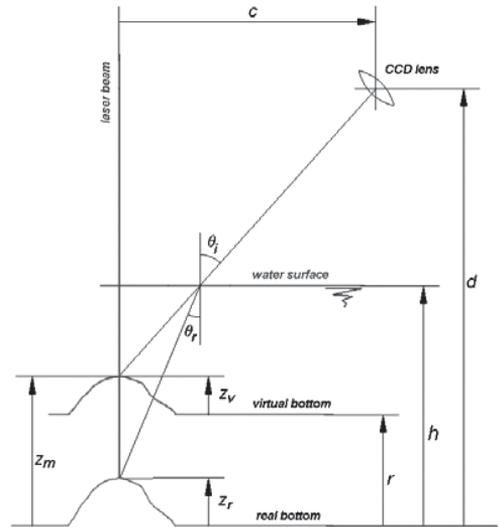


Figure 7 Influence of refraction with the pattern

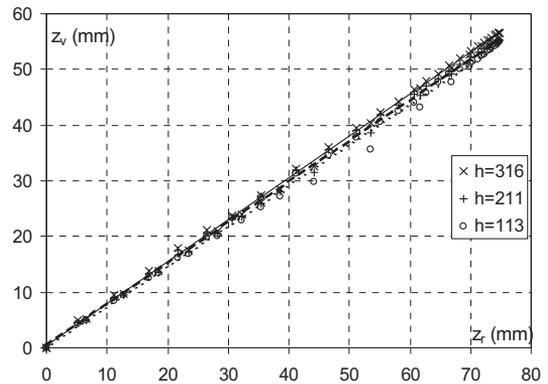


Figure 8 Experimental relationship between real and virtual elevation

In Fig. 8 we present the experimental results of the virtual and the real elevations. This tendency matches the theoretical analysis of the variables.

The initial conclusion is the deviation of the results from the bisectrix ($z_v = z_r$), reflecting the effect of refraction on the measurements taken. The most important result was found in the linear relationships obtained with high correlations (values of r^2 ranging from 0.9977 to 0.9992).

Figure 9 presents the deviations of the virtual elevations corresponding to each depth relative to its regression line. Although the estimation of uncertainty is detailed in the following section, in this series of tests the measurement error is generally below 1 mm.

4.3 Accuracy of 3D-scanner

The previous results show the suitability of the 3D-scanner in the reproduction of real and virtual elevations. Figures 6 and 8 show two linear relationships among the fundamental variables of the

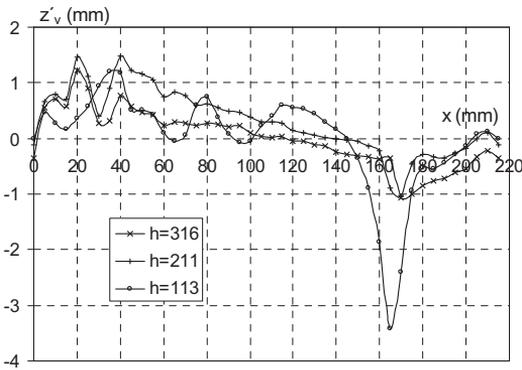


Figure 9 Deviations of the measurements of the pattern profile relative to the regression lines with different depths

two test series:

$$r = C_1 \cdot h \tag{25}$$

$$z_v = C_2(h) \cdot z_r \tag{26}$$

Equation (26) maintains the linear form since, while the value of C_2 depends on depth h , as it can be seen in Fig. 8, it will remain constant or quasi stationary throughout the experiments. This is why it has been considered as such.

To summarize the procedure, we must point out that for a specific configuration of the instrument with a pre-set elevation from the channel bottom, the calibration constants C_1 and C_2 are determined through a series of previous tests. So, for each subsequent test under unsteady conditions, the 3D-scanner will measure the distances to the surface of the pattern or sediment bed, which may be converted into real elevations over the channel bottom as illustrated in the following relationship:

$$z_r = \frac{1}{C_2} z_v = \frac{1}{C_2} (z_m - r) = \frac{1}{C_2} z_m - \frac{C_1}{C_2} h \tag{27}$$

Moreover, the overall accuracy and resolution are determined by the precision of the 3D-scanner established at 0.5 mm, the magnitude and accuracy of the measurement of the constants and the accuracy of the depth measurement, which also has a value equal to 0.5 mm. Constants C_1 and C_2 are obtained statistically with a correlation of around one ($r^2 = 0.9998$ for C_1 , and $r^2 = 0.9977$ for C_2), and their absolute values in the tests are 0.2694 and 0.7385, corresponding to the slopes of Figs. 6 and 8, respectively.

After carrying out an error analysis in Eq. (27), and introducing the values obtained during the calibration, we arrive at the global error in the measurement of the real-bottom elevations:

$$\begin{aligned} \Delta z_r &= \frac{1}{C_2} \Delta z_m + \frac{C_1}{C_2} \Delta h \\ &= 1.354 \cdot \Delta z_m + 0.365 \cdot \Delta h = 0.860 \end{aligned} \tag{28}$$

where Δz_m is the error in the 3D-scanner measurement (0.5 mm), and Δh the error in the depth measurement (0.5 mm).

Table 1 Experimental tests to compare the experimental tools and validate the numerical model

	Q(m ³ /s)	Slope (%)	Sand thickness (m)
Test I	0.020	0	
Test II	0.030	0	0.12
Test III	0.022	0.052	0.045
Test IV	0.010 (0–30 min)	0.055	0.05
	0.020 (30–60 min)		
	0.030 (60–75 min)		

5 Experimental validation and calibration of the numerical model

The numerical model presented here has been validated experimentally in the same channel presented in the preceding section, where we installed the instruments used to record the velocity fields and sediment bed profiles.

5.1 Validation planning

The fundamental objective of this section is the validation of the numerical model with the application of laser technologies as tools to measure the variables involved. To do this, a plan was designed to the attainment of the partial results, as we will comment on below.

The tests developed have been summarized in Table 1. The experimental validation of the numerical model proposed here is developed by working exclusively with bedload transport and uniform granular sediment with a median sediment size of 1 mm. In the tests carried out there was no additional sediment load in any section of the channel (clean water tests) and a plane bed was maintained at all times.

The first part of the established plan dealt with the calibration of the instruments used in the tests, including a comparison between the measurements obtained for the same variable using different tools (Tests I and II). Test I was developed to analyse PIV records of the velocity profiles in the vicinity of a weir. In Test II, a layer of sediment was introduced upstream with the same height as the weir, and erosion processes and the accumulation of sediments upstream of the weir were analysed using PIV to measure water velocities and the 3D-scanner to measure the sediment bed. In this series the slope was kept at a horizontal level and bedload transport only occurred, as in all tests, until a final equilibrium profile was reached (Fig. 10).

The second part of the study was carried out to demonstrate the proper behaviour of the numerical model, by comparing experimental and numerical results. First, there is a detailed analysis

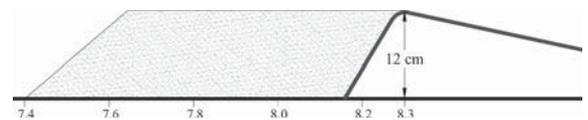


Figure 10 Diagram of the weir and fill layer. Crest of weir in section 8.3. Test II

of the records and the evolution of the mean longitudinal profile of the sediment bed in the channel, carried out in the middle of the channel bed, to shed light on the evolution of the points showing the greatest signs of erosion. This study allowed us to compare different sediment transport equations implemented in the numerical model. In order to achieve this specific objective, a test was developed, among others, involving a constant flow circulating over a layer of sediment which gradually eroded (Test III).

In Test III the sediment was placed in the central part of the channel, between 4.5 and 9 m from its upstream end. The bedload transport was slow and symmetrical over the width of the channel so that the total progression of the material was 3.15 m. The final thickness of the layer amounted to roughly 0.03 m over the entire length, except in a small, transitional zone around the ends. The field analysed with the instruments covered the points corresponding to the interval between 7.63 and 8.23 m, well-centred and far enough away from the edges of the layer of sand.

Later the results of the profiles transverse to the predominant direction of flow were analysed, as a part of the experimental analysis and validation of the two-dimensional behaviour of the flow.

Lastly, the record of velocities and the comparison with those found using the numerical model, helped us to determine the time evolution of the velocity profiles, the shear stresses obtained from them and finally the sediment bed profile. Test IV was developed with the specific objective of reflecting the accuracy of the numerical model in unsteady conditions with a variable flow. In this way the circulating flow in this test was 0.010 m³/s in the first 30 min, 0.020 m³/s in the next 30 min, and 0.030 m³/s until minute 75, at which time the test was stopped artificially. In this case the channel slope was fixed at value of 0.055%, and the sediment was placed at an interval of lengths of 4.5–8.5 m, with a thickness of the aggregate layer of 0.05 m.

5.2 Calibration of the instruments and a comparison of the results

The velocities were measured by means of PIV which allows the recording of the hydrodynamic field in unsteady flow.

Although it was initially thought that the precision of PIV systems was limited to the pixel dimension, the introduction of sub-pixel interpolation algorithms (Willert and Gharib, 1991) has improved it substantially. PIV with sub-pixel accuracy has a widely accepted accuracy of 0.1 pixel. Westerweel (2000) studies yield a theoretical limit of 0.02 pixels under ideal circumstances. In a practical situation, with particles of different diameters and not regularly illuminated, the accuracy is reduced to a range between 0.05 and 0.1 pixels. Our LaVision Flowmaster III system has two cameras with 1280 × 1024 CCDs. Tracer location precision is about 1/10000 the viewed area in physical units. For an area 40 cm wide, we have a precision in the distance scale of 40 μm. The evolution of the sediment bed was also recorded with the 3D laser scanner presented before.

A key aspect in the measurement of all the variables involved was the automation of the instruments, which made it possible

to record, on a continuous and joint basis, all the most important parameters in the zones of greatest interest, as it can be seen in Fig. 3.

In the first experimental phase, Tests I and II were developed to calibrate the instruments used and to be able to compare the results obtained at similar points. The results of Test I are presented in Fig. 11, showing the bottom of the channel, the shape of the weir and the velocity field upstream of the weir.

Figure 12 displays the results of Test II, with the evolution of the sediment bed. The measurements were taken by means of PIV and a 3D-scanner in the middle section of the area closest to the weir, to obtain the evolution of the variables in this area.

The figure shows a great similarity between the results obtained with both tools, with an initial reduction in the most pronounced heights in the area near the weir, then progressing over time to the final profile (Fig. 13).

Therefore calibration was continued with Test III to obtain new results to compare (Fig. 14), with the sediment bed profile obtained experimentally by means of the PIV technique and 3D-scanner in the middle section of the channel. The bed elevations are shown using the channel bottom as a reference.

Once again, we found that two instruments gave a similar reading on the bed profile. The most important conclusion to be drawn in this section is that very little difference was found between the measurements taken with the PIV technique and

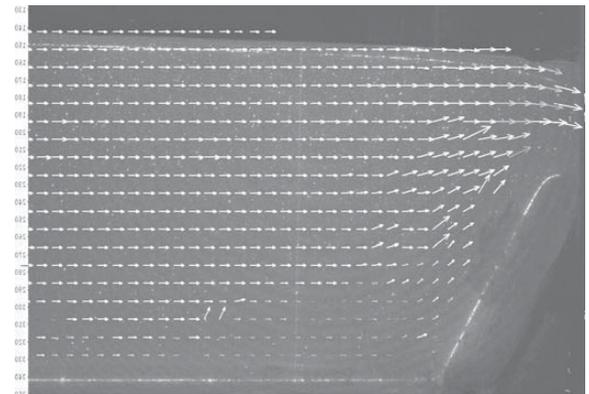


Figure 11 Velocity field obtained using PIV in the vicinity of the weir. Test I

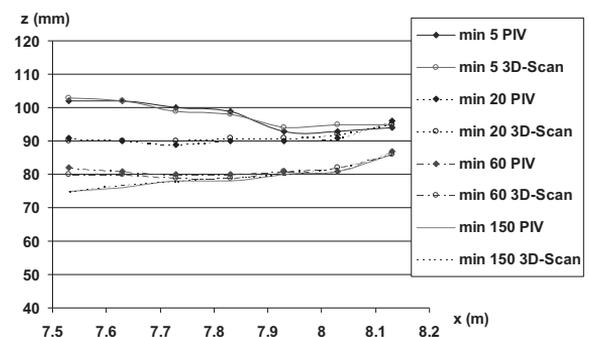


Figure 12 Time evolution of the longitudinal bed profile. Test II

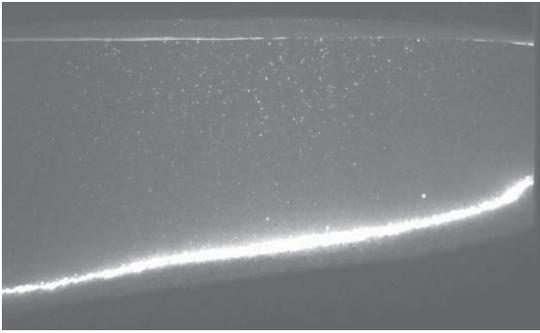


Figure 13 Bed profile obtained with PIV. Test II

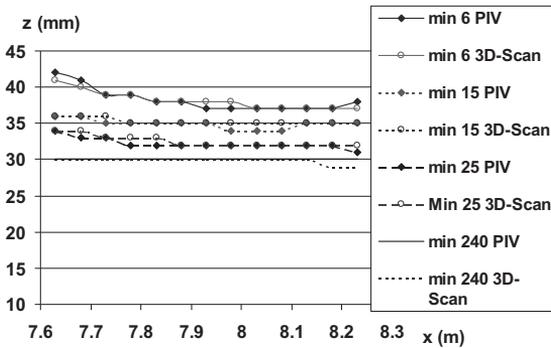


Figure 14 Time evolution of the longitudinal bed profile. Test III

the 3D-scanner, which allows us to compare in real time and in unsteady conditions—and with a high degree of accuracy—the results of these two experimental tools with those obtained using the numerical model. The use of the 3D-scanner out of the mid-plane supplements the information obtained with PIV, although the extension to the 3D measurement of the sediment bed profile with this instrument is still in the developmental stage.

5.3 Experimental results and a comparison with the numerical model

This section presents the results of the tests conducted for the experimental validation of the numerical model. The scheme used was to present this validation through the achievement of a series of partial goals, which are necessary to demonstrate the proper functioning of both blocks of the two-dimensional model.

5.3.1 Longitudinal profile in the mid-plane

In this part we compare the results of the numerical model with those obtained in Test III. Since it was impossible to take the measurements at all points with the PIV technique and 3D-scanner, the bottom profile along the entire channel was measured with conventional methods.

In the numerical model the finite volume mesh was obtained by means of a previous discretization of the channel into 1057 nodes and 1800 triangles with a separation of 83.3 mm in the transversal direction and 100 mm in the longitudinal direction.

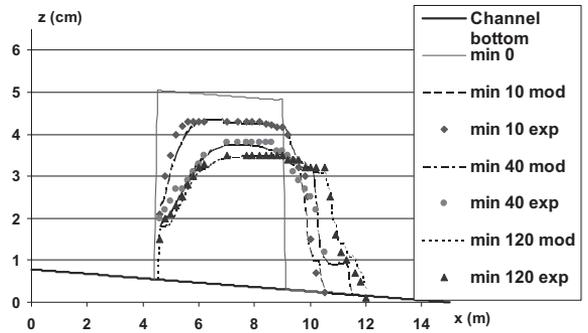


Figure 15 Longitudinal profile of the evolution of the bed. Test III

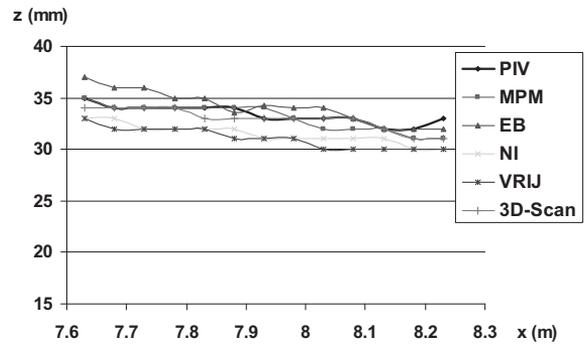


Figure 16 Comparison of the longitudinal bed profile. $T = 20$ minutes. Test III

Figure 15 shows the sediment bed evolution obtained from its mean longitudinal section with the numerical model. The solid discharges were calculated here by means of Meyer-Peter and Muller’s bedload transport formula with a porosity value equal to 0.4, which remained constant in all the runs.

This first result shows that the numerical model behaves well in the longitudinal analysis along the entire channel, and that it gives an accurate picture of the process of sediment drag and deposition in zones that were not previously covered with aggregate.

In Test III we also applied the laser technologies to centre the monitoring of the bottom profile on the central part of the channel, taking advantage of the potential of the PIV technique and 3D-scanner to record the fundamental variables. Thus, the results in the central part were compared with those obtained executing the numerical model with the four solid transport equations implemented in the model.

Figure 16 shows the first comparison carried out between the numerical model, PIV and the 3D-scanner, reflecting the longitudinal profile obtained in the central zone and mid-section of the laboratory channel, at minute 20. The figure legend gives the abbreviations of the bedload transport formulas with the following nomenclature: MPM (Meyer-Peter and Müller), EB (Einstein & Brown), NI (Nielsen), VRIJ (Van Rijn). The first evaluation of the results—which is repeated in a similar fashion throughout the entire experimental validation of the numerical model—is that all the formulas present an accurate representation of the sediment bed measured with the instruments. As in the previous result,

Table 2 RMS error of the results with respect to the measurements taken with PIV. Test III

	RMS error (mm)
Meyer-Peter & Müller	0.226
Einstein & Brown	0.376
Nielsen	0.572
Van Rijn	0.679
3D-scanner	0.226

which reflected the proper monitoring of the bed profile along the entire channel, this new test verifies the accuracy reached at specific points such as the central part of the channel, particularly the calculations that involve the transport of granular bed sediments. Moreover, this test allows us to compare the sediment transport formulas introduced in the model and to calculate the differences found between them.

Table 2 shows the root mean square error (RMS) obtained with the numerical model and the 3D-scanner with respect to the measurements taken with the PIV technique, calculated with the following formula:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - x_{iPIV})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (29)$$

where n is the number of measurements (number of cross sections).

The RMS errors obtained make it possible to validate the suitability of the formulas used in the test. The Meyer-Peter & Muller’s formula was the one that best fitted the results recorded with the instruments. Van Rijn’s expression also contributed the highest solid discharge values, which means that there is greater erosion in the entire domain, followed on this scale by Nielsen’s formula. Lastly, Einstein & Brown’s was the one that produced the least amount of erosion on the layer of sand placed in the central zone of the experimental channel. These evaluations may be extended, except in the case of very specific points and instants in time, to all the other tests conducted for the experimental validation of the numerical model.

The experimental and numerical data were also compared with the results of Test II, regarding to the evolution of the longitudinal profile of the sediment bed. The finite volume mesh was obtained with a cross and lengthwise separation of 83.3 and 100 mms, respectively, which resulted in a total of 588 nodes.

Figure 17 and Table 3 show the results obtained at minute 30 working with PIV, the 3D-scanner and the numerical model implementing the four bedload transport formulas.

The results obtained are considered to be acceptable in the entire analysed domain, especially at the points farthest away from the area of the weir. The last two sections, which correspond to a distance of roughly 0.2 m in relation to the edge of the weir, show the greatest error in determining the bed profile. However, in the worst case, this error does not exceed 3 mm, therefore this phenomenon is considered to be properly represented. The previous analysis on the different transport formulas may be extended to this test.

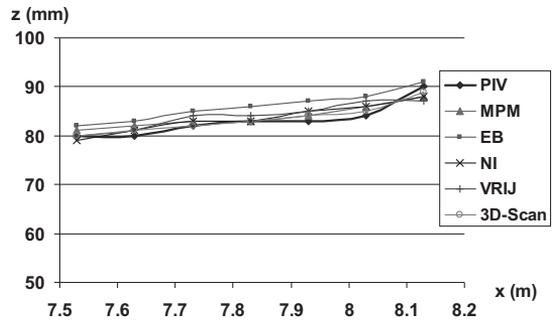


Figure 17 Comparison of the longitudinal bed profile. $T = 30$ minutes. Test II

Table 3 RMS error of the results with respect to the measurements taken with PIV. Test II

	RMS error (mm)
Meyer-Peter & Müller	0.577
Einstein & Brown	1.195
Nielsen	0.577
Van Rijn	0.816
3D-scanner	0.309

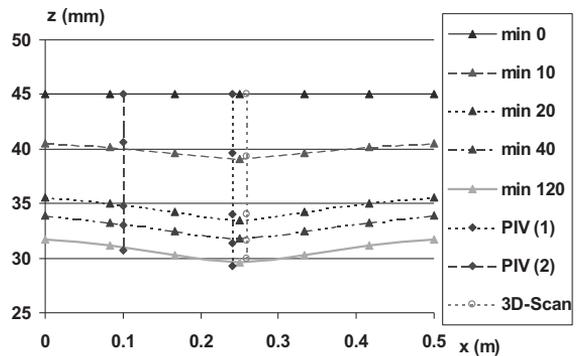


Figure 18 Time evolution of the transverse sediment bed in the cross section. Test III

5.3.2 Transversal profiles

In addition, it was necessary to validate that the two-dimensional numerical model properly represented the increased erosion that takes place in the central part of the channel as compared to the erosion along the sides. In order to achieve this objective, Test III was chosen to compare the experimental and numerical results.

Figure 18 presents the results obtained in test using the numerical model with the Meyer-Peter & Muller’s formula. Figure 18 shows that the greatest erosion rate in the central area of the cross section occurs during the initial stages of the experiment. We have included the results obtained in the section located 8.2 m upstream of the channel, using both the 3D-scanner as well as two tests with PIV, the first using the measurements in the mid-channel section and the second situating the measurement plane 0.10 m from the edge.

Table 4 Comparison of the depth-averaged flow velocity. Test IV

Point	V_{PIV} (m/s)	V_{model} (m/s)
8.2	0.57	0.55
8.1	0.54	0.54
8.0	0.55	0.53
7.9	0.54	0.53

This figure shows the proper functioning of the numerical model in the cross section analysis as well, which reflects the two-dimensional behaviour in the channel.

5.3.3 Time evolution of the velocity field

This section presents the experimental tests conducted on behalf of the validation of the numerical model, as regards the velocity profiles and their evolution over time.

The first results have been used to compare the depth-averaged flow velocity obtained with the numerical model and the velocity profiles recorded with the PIV technique in Test III, in the middle section of the channel at minute 10 (Table 4).

The numerical model was also compared in unsteady conditions with variable flow, through the comparison of the results with Test IV. Measurements of both velocities and bed profile were carried out only with the PIV technique. Another important aspect in the experimental validation of the numerical model—which prompted this test—was to check that the experimental results and the run with the numerical model coincided at each instant. In the 5 min subsequent to the introduction of the new flow conditions, continuous interactions were carried out between the hydrodynamic block and the morphological block, in order to reflect their suitability to these conditions. Figure 19 presents the evolution in time of the depth-averaged flow velocity obtained in the section located 8.0 m upstream of the channel with the PIV technique and with the numerical model.

It can be also noted that the greatest differences between the numerical model and the experiment occurred during the first instants of the introductions of the new flows. However, the two trends properly reflect the increase in velocity produced by

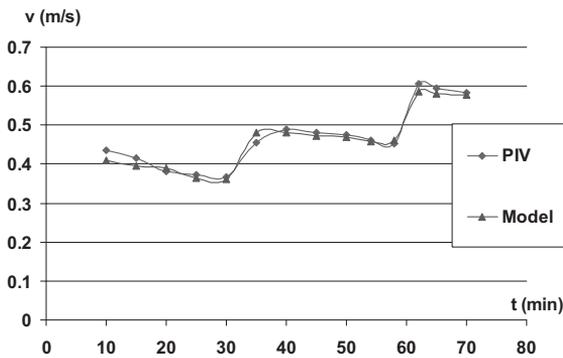


Figure 19 Comparison of the time evolution of the depth-averaged flow velocity. Test IV

Table 5 Comparison of the depth-averaged flow velocity. Test II

Point	V_{PIV} (m/s)	V_{model} (m/s)
8	0.51	0.49
7.9	0.48	0.48
7.8	0.46	0.47
7.7	0.47	0.47
7.6	0.46	0.46

the flow contributions and the reduction of the velocity in each stretch, as the sediment bed erodes.

The third comparison with velocities presented was carried out with the results of Test II in the vicinity of the weir, as indicated earlier. One of the main reasons for developing this test was the variability in the velocity profile in the zone just before the crest of the weir, caused by the evolution of the bottom elevation. As the numerical model is only able to determine the depth-averaged flow velocity (Table 5), the main objective of this comparison was to analyse the applicability of the numerical model in situations where the flow is obstructed and there are variations in the velocity profile. The results obtained are presented in the nodes that are compatible with the experimentation and the finite volume mesh at minute 20.

The results show the proper application of the numerical model in the case studied here, which produced values very similar to the depth-averaged flow velocity. In the profiles nearest to the weir, there was an increase in the vertical component of velocity, which produced a greater difference between the results obtained. The previous analysis was repeated at different time intervals of the same simulation and the experimental test, resulting in similar comparisons to the above, confirming the lack of accuracy of the depth-averaged numerical model in that specific location.

5.3.4 Time evolution of the sediment bed profile

This last section offers a comparison between the results of the numerical model and the experimentation related to the temporal analysis of the evolution of a sediment bed.

As discussed earlier, the files obtained from the measurements with the PIV technique contain results of the two components of velocity and the point at which they were recorded. By focusing the study on a specific section of the channel, it is possible to obtain the time evolution of the velocity profile corresponding to this section. This enabled us to take advantage of the test results with a constant flow (Test III) for the experimental determination of two fundamental variables such as the shear velocity or the shear stress. In a rough turbulent flow regime, the shear velocity is related to the velocities of a section by means of the following formula:

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{30 \cdot z}{k_s} \right) \tag{30}$$

After carrying out a least squares regression analysis with the experimental data, it is possible to calculate the shear velocity value in each section and at the selected time interval. In addition, the temporal analysis of the shear velocity is directly related to that of the boundary shear stresses. A comparison of these

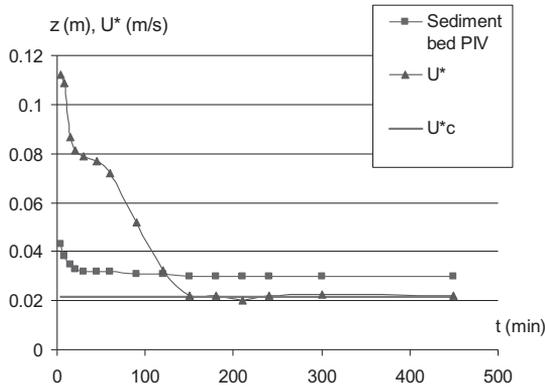


Figure 20 Time evolution of the shear velocity (m/s) and the bed profile (m) recorded with PIV. Test III

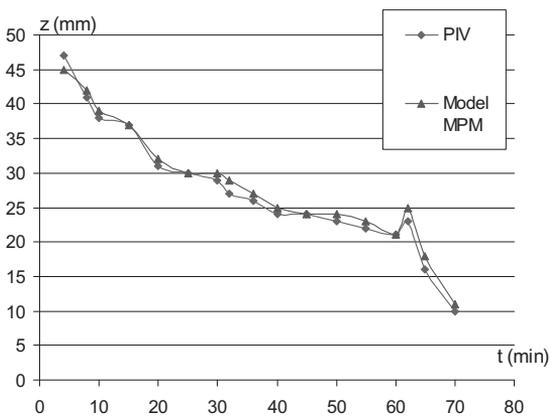


Figure 21 Time evolution of the bed profile. Test IV

parameters with the critical shear velocity or the critical shear stress helps to shed light on the extent of the erosion of the existing material and the evolution towards a possible bed equilibrium profile.

Figure 20 depicts the time evolution of the shear velocity and the elevations of the bottom measured with PIV. Also included is a drawing of the critical shear velocity which was obtained through Shields expression from the beginning of the movement corresponding to coarse sand 1 mm in median sediment size, with a value of 0.0216 m/s (Julien, 1995).

This study applied to Test III has allowed us to analyse the evolution of the sediment transport through the velocity field measurements. Thus we have been able to confirm that in the first part of the experiment there is a considerable mobilization of material. Around minute 40, the sediment bed tends to stabilize, which is also recorded in the trend seen in the shear velocities. However the material drag still occurs which is substantially diminished in the following time intervals, stopping around minute 240. At this instant, the shear flow velocities calculated are roughly equal to the critical shear velocity.

The last comparison in this section refers to Test IV. The results obtained from the sediment bed elevations using the PIV technique and the numerical model (with Meyer-Peter & Muller’s

formula) have allowed us to analyse the comparison of the time evolution of the bed profile, carried out in the following graph in the section located 7.9 m upstream from the channel.

Figure 21 shows the continuous decrease in the thickness in the sediment layer, with a specific rise in the sediment bed elevation during the first few minutes of circulation of the third flow introduced.

The comparison has made it possible to validate the numerical model with the variable flow test, and the correct monitoring of the bed profile and its evolution.

6 Conclusions

The main conclusions presented in this paper are the experimental validation of a two-dimensional depth-averaged numerical model with sediment transport and the application of a 3D-scanner to measure the sediment bed evolution.

The numerical model calculates hydrodynamics and bedload transport with uniform granular sediment in unsteady flow using the finite volume method. This numerical model implements upwind schemes to guarantee the convergence and stability in the hydrodynamic and morphological blocks, which operate in an uncoupled fashion in the same run.

The results obtained with the numerical model have been compared with those taken from two laser technologies, PIV and a scanner, which records the centre line of an underwater sediment bed surface. To prove the applicability of this scanner in sediment transport processes, a series of tests were developed to quantify the effect of refraction on the incident laser beam. A linear relationship was obtained between the real elevations of the points of an object and the virtual elevations recorded with the 3D-scanner, for different depths. The resolution attained in all the measurements was less than 1 mm, which reflects the ability of this instrument to solve sediment bed elevations accurately and nonintrusively.

The experimental validation of the numerical model was carried out by setting up a series of tests for each specific objective, with bedload transport and uniform granular sediment 1 mm in size. The comparison between the computational and experimental data shows that the numerical model accurately reproduced the longitudinal and transversal profiles of the sediment bed, as well as the velocity fields, in tests with both constant and variable flows, showing the proper coupling between the hydrodynamic and morphological subroutines.

The results presented here are intended to demonstrate the usefulness of new experimental technologies in sediment transport for validating a numerical model and to advance the application of laser technologies in experimental hydraulics.

Acknowledgments

The authors are grateful to the support provided by the University of A Coruña through the Research Projects presented by the Training Teams in 2004.

Notation

- A_i = Area of each finite volume
 \bar{c}_b = Average concentration of suspended sediment on the bed
 d_i = Representative sediment size
 $d_* = d_{50} \left(\frac{g \cdot (G-1)}{v^2} \right)^{1/3}$ dimensionless sediment size
 E_s = Dimensionless factor of the intake of suspended sediment
 g = Gravity
 $G = \frac{\rho_s}{\rho}$ = relative density of sediment and fluid
 h = Flow depth
 P_e = Perimeter of the cell of the finite volumes
 p_0 = Porosity
 q_b = Bedload discharge
 R_h = Hydraulic radius
 S_f = Friction slope
 S_0 = Geometric slope
 t = Time
 θ_i = Angle of incidence between the laser beam and the camera lens in the 3D-scanner
 θ_r = Angle of refraction between the laser beam and the camera lens in the 3D-scanner
 τ_b = Boundary shear stress
 τ_b^* = Dimensionless shear stress or Shields parameter
 τ_c^* = Critical dimensionless shear stress
 $\tau_{ef}^* = \left(\frac{\tau_b - \tau_c}{\tau_c} \right)^{2.1}$ = effective dimensionless shear stress
 u^* = Shear velocity
 (u, v) = Mean values of the components in plane view of the velocity vector
 V = Depth-averaged flow velocity
 w_s = Fall velocity
 (x, y, z) = System of Cartesian coordinates (x, y plane parallel to the bottom, z the direction perpendicular to the bottom)
 Z_b = Sediment bed elevation
 z_r = Real elevations from the bottom (3D-scanner)
 z_m = Elevations measured with the 3D-scanner
 z_v = Relative elevations of the bottom with the 3D-scanner after subtracting elevation of the bottom of the channel as an offset

References

- Adrian, R.J. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. Fluid.* 39, 159–169.
 Adrian, R.J., Christensen, K.T., Liu, Z.C. (2000). Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. *Exp. Fluid.* 29, 275–290.
 Afanasyev, Y.D., Demirov, E.K. (2005). A variational filtration and interpolation technique for PIV employing fluid dynamical constraints. *Exp. Fluid.* 39, 828–835.
 Ahmed, S.M., Sato, S. (2001). Investigation of bottom boundary layer dynamics of movable bed by using enhanced PIV technique. *Coastal Engrg.* 43(4), 239–258.
 Alcrudo, F., García-Navarro, P. (1993). A high resolution godunov type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations. *Int. J. Num. Meth. Fluid.* 16, 489–505.
 Anastasiou, A., Chan, C.T. (1997). Solution of the shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes. *Int. J. Num. Meth. Fluid.* 24, 1225–1245.
 Ballio, F., Raadice, A. (2003). A non-touch sensor for local scour measurements. *J. Hydraul. Res.* 41(1), 105–108.
 Bermúdez, A., Dervieux, A., Desideri, J., Vázquez-Cendón, M.E. (1998). Upwind schemes for the two dimensional shallow water equations with variable depth using unstructured meshes. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engrg.* 155, 49–72.
 Best, J., Ashworth, P. (1994). A high-resolution ultrasonic bed profiler for use in laboratory flumes. *J. Sediment Res.* 24, 279–288.
 Brufau, P., Vázquez-Cendón, M.E., García-Navarro, P. (2002). A numerical model for the flooding and drying of irregular domains. *Int. J. Num. Meth. Fluid.* 39, 247–275.
 Caleffi, V., Valiani, A., Zanni, A. (2003). Finite volume method for simulating extreme flood events in natural channels. *J. Hydraul. Res.* 41(2), 167–179.
 Cea, L., Ferreira, A., Vázquez-Cendón, M.E., Puertas, J. (2004). Experimental and numerical analysis of solitary waves generated by bed and boundary movements. *Int. J. Num. Meth. Fluid.* 46, 793–813.
 Chaudhry, M. (1993). *Open Channel Flow*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA.
 Chien, N., Wan, Z. (1999). *Mechanics of Sediment Transport*. ASCE-Press, Virginia, USA.
 Delft Hydraulics. Video based measurement techniques at WL. PDF document at Delft Web Page. Available at <http://www.wldelft.nl/proj/pdf/3uk00208.scherm.pdf>.
 Einstein, H.A. (1950). The bedload function for bedload transportation in open channel flows. *Technical Bulletin No. 1026*, USDA, Soil Conservation Service, USA.
 García, M. (1999). *Sedimentation and Erosion Hydraulics. Chapter 6: Hydraulic Design Handbook*. Edited by Larry Mays, McGraw-Hill Inc.
 García-Navarro, P., Vázquez-Cendón, M. E. (2000). On numerical treatment of the source terms in the shallow water equations. *Comp. Fluid.* 29, 951–979.
 Godlewski, E., Raviart, P. (1996). *Numerical Approximation of Hyperbolic Systems of Conservation Laws*. Springer, New York, USA.
 Hancock, G., Willgoose, G. (2001). The production of digital elevation models for experimental model landscapes. *Earth Surf. Proc. Land* 26, 475–490.
 Harten, A., Lax, P., Van Leer, B. (1983). On upstream differencing and godunov-type schemes for hyperbolic conservation laws. *SIAM Rev.* 25, 35–61.
 Harten, A. (1984). On a class of high resolution totalvariation-stable finite-difference schemes. *J. Num. Anal.* 21(1), 1–23.

- Hendriks, I.E., Van Duren, L., Herman, P. (2004). *Flow Dependent Processes in Settlement of Intertidal Bivalve Larvae*. Chapter 6: Measurements of Nearbed Flow Under Different Turbulence Levels. Edited by Ponsen, Wageningen, The Netherlands.
- Julien, P.Y. (1995). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Leveque, R., Yee, H.C. (1990). A study of numerical methods for hyperbolic conservation laws with stiff source terms. *J. Comp. Phys.* 86, 187–210.
- Mccallum, B., Nixon, M., Price, B., Fright, R. (1996). A feasibility study of hand-held laser surface scanning. *Proc. of Image and Vision Computing New Zealand*, 103–108.
- Meselhe, E.A., Bradley, A., Kruger, A., Muste, M. (1998). PIV and numerical modelling for flow estimation and analysis in coastal marshes. Recent Research in Coastal Louisiana: Natural System Function and Response to Human Influences. *Symposium Convened by the Louisiana Universities Marine Consortium*, Lafayette, Louisiana.
- Meyer-Peter, E., Müller, R. (1948). Formula for bedload transport. *Proceedings of 2nd IAHR Congress*, 39–64.
- Mingham, C.G., Causon, D.M. (1998). Highresolution finite-volume method for shallow water flows. *J. Hydraul. Engrg. ASCE* 124(6), 604–614.
- Munro, R.J., Dalziel, S.B. (2005). Attenuation technique for measuring sediment displacement levels. *Exp Fluid.* 39, 600–611.
- Nielsen, P. (1992). Coastal bottom boundary layers and sediment transport. *Advances Series on Ocean Engineering*, 4, World Scientific Publishing, Singapore.
- Peña, E., Fe, J., Sánchez-Tembleque, F., Puertas, J. (2002). A 2D numerical model using finite volume method for sediment transport in rivers. *Proceedings of International Conference on Fluvial Hydraulics*. Louvain-la-Neuve, Belgium, 693–698.
- Peña, E., Sánchez-Tembleque, F., Puertas, J., Pena, L. (2006). Bidimensional measurement of an underwater sediment surface using a 3D-Scanner. *Opt. Laser Tech.* 39(3), 481–489.
- Raffel, M., Willert, C., Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Raudkivi, A.J. (1998). *Loose Boundary Hydraulics*. Balkema, Rotterdam, Holland.
- Richards, K.S., Robert, A. (1986). Laboratory experiments with the hr multipurpose profile follower on a rippled sand bed. *Department of Geography Working Paper*, 22, University of Cambridge.
- Rooij, F., Dalziel, S.B., Linden, P.F. (1999). Electrical measurement of sediment layer thickness under suspension flows. *Exp. Fluid.* 26, 470–474.
- Sambrook, G.H., Nicholas, A.P. (2005). Effect on flow structure of sand deposition on a gravel bed: Results from a two-dimensional flume experiment". *Wat. Resour. Res.* 41(10), DOI:10.1029/2004WR003817.
- Toro, E.F. (1997). *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. A Practical Introduction*. Springer-Verlag, Berlin, Germany.
- Van Rijn, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Aqua Publications, Amsterdam, Holland.
- Vázquez-Cendón, M.E. (1999). Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry. *J. Comp. Phys.* 148, 497–526.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. (1995). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method*. Addison Wesley Longman Ltd., Essex, UK.
- Williams, D.T., Julien, P.Y. (1989). Applicability index for sand transport equations. *J. Hydraul. Engrg. ASCE* 115(11), 1578–1581.
- Westerweel, J. (2000). Theoretical analysis of the measurement precision in particle image velocimetry. *Exp. Fluid.* 29, s3-s12. DOI: 10.1007/s003480070002.
- Willert, C.E., Gharib, M. (1991). Digital particle image velocimetry. *Exp. Fluid.* 10, 181–193. DOI: 1007/BF00190388.
- Wormleaton, P.R., Ewunetu, M. (2006). Three-dimensional $k - \epsilon$ numerical modelling of overbank flow in a mobile bed meandering channel with floodplains of different depth, roughness and planform. *J. Hydraul. Res.* 44(1), 18–32.
- Wu, W., Rodi, W., Wenka, T. (2000). 3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels. *J. Hydraul. Engrg. ASCE* 126(1), 4–15.
- Yang, C.T., Wan, S. (1991). Comparisons of selected bed-material load formulas. *J. Hydraul. Engrg. ASCE* 117(8), 973–989.