

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

USO DE VIDEO DE BAJO COSTO PARA LA MEDICIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES COMO APOYO A LA DOCENCIA: CASO DE ESTUDIO EN LA MEDICIÓN DEL SET-UP DEL OLEAJE

ÁLVARO OSSANDÓN Á.¹
PATRICIO CATALÁN M.^{2,3,4}
RAÚL FLORES A.⁵

RESUMEN

Una de las dificultades tradicionales de la implementación de laboratorios como apoyo en la docencia lo constituye el costo de adquisición y operación de instrumentos de medición de alta precisión. Si bien en términos de precisión los resultados obtenidos con estos dispositivos son excelentes, en general tienen la desventaja de una resolución espacial y capacidad de muestreo limitada. En este contexto, el uso de sensores de bajo costo que combinen aspectos visuales-didácticos con medición se hace atractivo en el marco de la docencia de la ingeniería hidráulica, por ejemplo, en la utilización de canales hidráulicos.

En este trabajo se analiza la aplicación de un sistema de bajo costo, en el cual señales de video de alta resolución capturadas con una cámara de consumidor, son utilizadas en un canal hidráulico con fondo inclinado, con el fin de calcular la variación de la altura de ola y nivel medio de la superficie libre. El análisis es realizado utilizando algoritmos de procesamiento de imágenes que permiten obtener series de tiempo de superficie libre para ubicaciones escogidas, para determinar los perfiles de altura de ola y variación del nivel medio (set-up). Para validar las mediciones, los perfiles resultantes son comparados con las estimaciones que modelos teóricos arrojan de dichas cantidades, obteniendo buena concordancia. Adicionalmente, a partir de las series de tiempo de altura de ola se calculan los coeficientes de asimetría y skewness, que permiten cuantificar la no linealidad del oleaje.

Los procedimientos y algoritmos desarrollados son fácilmente extrapolables para otros experimentos relevantes para la docencia, como por ejemplo, determinar experimentalmente coeficientes de descarga de vertederos y calibración de compuertas.

¹ Alumno Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

² Profesor Auxiliar, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

³ Investigador Asociado, Centro Nacional de Gestión Integrada de Desastres Naturales, CIGIDEN

⁴ Investigador Asociado, Centro Científico Tecnológico de Valparaíso, CCTVal

⁵ Profesor Instructor Académico, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María

1. INTRODUCCIÓN

En muchas ocasiones cuando se realizan experiencias de laboratorio para medir una cantidad física en distintos puntos, por ejemplo, la variación de la presión a lo largo de un canal, nos enfrentamos a ciertos problemas como el no disponer de suficientes dispositivos para medir la presión (piezómetros) en los puntos necesarios, o que éstos no se encuentren ubicados donde se producen fenómenos de importancia. Por otra parte, el costo que implica la adquisición y operación de un número adecuado de estos instrumentos que permita caracterizar espacialmente el fenómeno analizado puede ser alto, y requiere en algunos casos de personal especializado. Ante estos inconvenientes, surge como alternativa la utilización de técnicas de medición no convencionales, como los sensores remotos, cuya naturaleza sinóptica permite monitorear simultáneamente una gran cantidad de secciones de interés a muy bajo costo, pudiendo caracterizar adecuadamente la variabilidad espacial y temporal de una gran cantidad de fenómenos. Un ejemplo de este tipo de sensor son las cámaras de video. Este tipo de sensores tienen además la ventaja de que el procesamiento de datos no involucra gran costo temporal, debido a las herramientas computacionales disponibles hoy en día. Como desventaja principal, se encuentra la necesidad de encontrar una función de transferencia entre la intensidad óptica y el fenómeno medido, y la calibración inicial a ser desarrolladas. Sin embargo, como se verá en lo que sigue, este proceso puede automatizarse con lo que se minimiza la interacción del usuario.

En este trabajo se emplean señales de video para estudiar la evolución del oleaje generado en un canal hidráulico con fondo variable (playa en un extremo), por medio de la medición de la altura de ola y variación del nivel medio de la superficie libre.

El trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se realiza una breve descripción de las condiciones experimentales. La sección 3 se describe el procedimiento para la obtención de los parámetros de la cámara. Procedimientos para la rectificación de las imágenes y obtención de las series de tiempo en los puntos seleccionados se presentan en la sección 4. En la sección 5 se realiza una revisión de la teoría respecto a la estimación de altura y nivel medio de la superficie libre, para efectos de comparar las mediciones. En la sección 6 se muestran los resultados obtenidos, para finalizar con la sección 7 donde se presentan las conclusiones y objetivos de futuros trabajos.

2. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Para realizar el experimento se utiliza un canal hidráulico fabricado por Armfield, modelo S6 MKII (Figura 1a), de 5 [m] de largo, 30 [cm] de ancho y 45 [cm] de profundidad. El canal posee en un extremo una paleta plana generadora de oleaje, que permite generar tanto oleaje regular como irregular. En el otro extremo del canal se instala una playa artificial (Figura 1b), cuyo pie se ubicó a 3.7 [m] desde la paleta. Las señales de video se registran mediante una cámara Sony de alta definición, modelo HDR CX-190, de tipo consumidor.

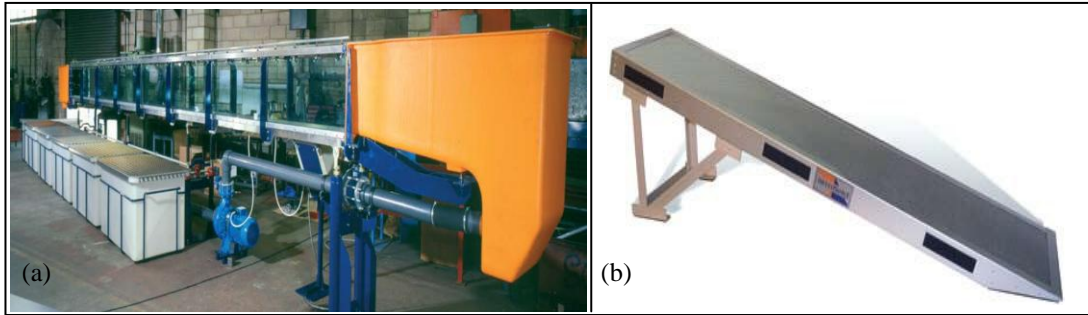


Figura 1. (a) Canal Hidráulico Armfield S6 MKII. (b) Playa Artificial Armfield S6 36.

El experimento consiste en la generación de dos series de oleaje, regular e irregular, los cuales consideran la especificación del clima de oleaje ingresando el dato de oleaje directamente (caso regular) o bien información de la tormenta que lo genera (caso irregular). Los parámetros relevantes para la generación de las series se muestran en la Tabla 1. De forma simultánea, se registran las señales de video, las que permiten capturar la evolución del oleaje desde que se acerca a la playa hasta su máxima incursión en la playa. En ambos casos, el nivel estático de agua es de 22.5 [cm].

Tabla 1. Tipos de Oleajes Generados.

Caso	Tipo	Frecuencia [Hz]	Amplitud Paleta [m]	Duración [seg]
1	Regular	1.4	1.1	107
Caso	Tipo	Velocidad [m/s]	Fetch [m]	Duración [seg]
2	Irregular, JONSWAP (viento)	5	1	134

3. CALIBRACIÓN Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA CÁMARA

Uno de los aspectos fundamentales del trabajo es poder transformar la información contenida en cada cuadro de la cámara (en un espacio de píxeles) a coordenadas del mundo real (en metros). Para ello, y por única vez, es necesario obtener las coordenadas reales de un set de puntos que queden dentro del área de captura de las imágenes, y las coordenadas de la cámara relativas a éstos. Lo anterior se obtiene realizando un levantamiento topográfico con taquímetro.

Luego, se procede a calibrar la cámara utilizando un cuadrículado de dimensiones 2.5x2.5 [cm], el cual se ubica a distintas distancias e inclinaciones respecto al plano de captura de la cámara, permitiendo la determinación de los parámetros intrínsecos e extrínsecos, asociados a características de la geometría focal y distorsión del lente. La obtención de dichos parámetros es muy similar a lo expuesto por Heikkilä et al (1997). A continuación se presenta una breve descripción de los parámetros y como estos permiten relacionar las coordenadas de las imágenes (píxeles) con las coordenadas reales.

Si consideramos un punto P en el espacio con coordenadas reales $XX = [X; Y; Z]$, éste se puede expresar en el marco de referencia de la cámara con vector de coordenadas $XX_c = [X_c; Y_c; Z_c]$ mediante la siguiente expresión:

$$XX_c = R_c XX + T_c \quad (1)$$

donde R_c y T_c son los parámetros extrínsecos de la cámara, correspondientes a una matriz de rotación de 3x3 y a un vector de traslación de 3x1, respectivamente. Dicho punto puede ser proyectado en el plano de la imagen por medio de los parámetros intrínsecos de la cámara, los que corresponden al Largo Focal (f_c) en pixeles, (vector de 2x1); a la ubicación del punto principal (cc) en pixeles (vector de 2x1); al coeficiente de oblicuidad (α_c) que define el ángulo entre los ejes x e y en pixeles, y al coeficiente de distorsión (k_c) radial y tangencial (vector de 5x1). Como resultado de la transformación, información tridimensional es proyectada a un espacio bidimensional en el plano de la imagen.

Considerando x_n como las coordenadas normalizadas del punto P, se tiene:

$$x_n = \begin{bmatrix} X_c / Z_c \\ Y_c / Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (2)$$

Luego, considerando $r^2 = x^2 + y^2$ e incluyendo la distorsión del lente, las coordenadas del punto P distorsionadas se definen como:

$$x_d = \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \end{bmatrix} = (1 + k_c(1)r^2 + k_c(2)r^4 + k_c(5)r^6) x_n + dx \quad (3)$$

donde dx es el vector de distorsión tangencial dado por:

$$dx = \begin{bmatrix} 2k_c(3)xy + k_c(4)(r^2 + 2x^2) \\ k_c(3)(r^2 + 2y^2) + 2k_c(4)xy \end{bmatrix} \quad (4)$$

Una vez aplicada la distorsión, las coordenadas en pixeles $[x_p; x_p; 1]$ de la proyección de P en el plano de la imagen son:

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 1 \end{bmatrix} = KK \begin{bmatrix} x_d(1) \\ x_d(2) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Lo anterior permite saber cuál debiera ser la posición del pixel si no existiera deformación ni distorsión en el lente. En la ecuación (5), KK es definida como la matriz de la cámara:

$$KK = \begin{bmatrix} f_c(1) & \alpha_c f_c(1) & cc(1) \\ 0 & f_c(2) & cc(2) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Para los experimentos realizados, se utilizan las imágenes capturadas de la cuadrícula y un toolbox para MATLAB© de uso libre⁶, para obtener los parámetros intrínsecos de la cámara. Luego, se ejecuta un algoritmo de rectificación, a través del cual se determinan los parámetros extrínsecos, por medio de la minimización del error de las coordenadas reales de un set de puntos en el canal (medidos con taquímetro) respecto a las obtenidas a partir de la proyección de la imagen en píxeles. Lo descrito se puede apreciar en la Figura 2, en la cual se observa el set de imágenes que se usan para la determinación de los parámetros intrínsecos (Figura 2a), los puntos de control (Figura 2c) y el resultado de la proyección de ellos (Figura 2d). Notar que luego de este proceso, cada pixel en la imagen está asociado a una dimensión real en milímetros, permitiendo la cuantificación a partir de la imagen.

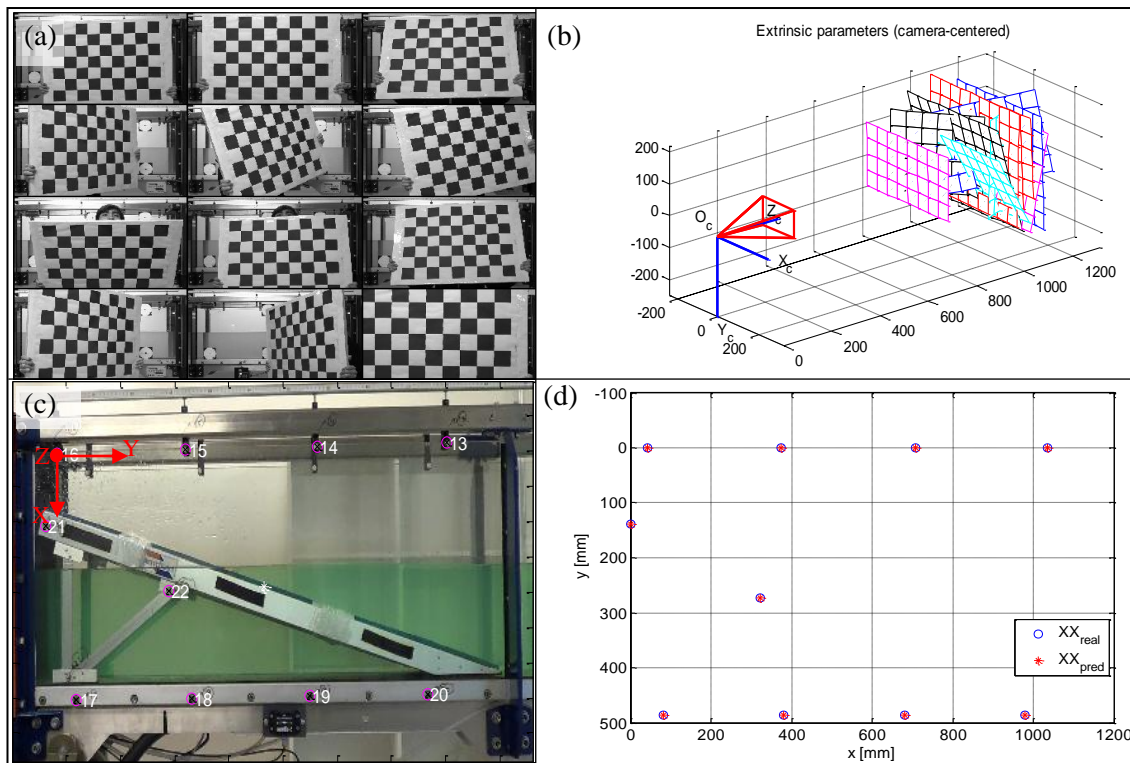


Figura 2. (a) Imágenes placa de ajedrez utilizadas para la calibración parámetros intrínsecos. (b) Proyección de las imágenes en píxeles con parámetros intrínsecos calibrados. (c) Puntos seleccionados para la calibración de los parámetros extrínsecos y proyecciones de los puntos seleccionados. (d) Coordenadas reales vs coordenadas predichas mediante parámetros de la cámara.

⁶ http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html

4. RECTIFICACIÓN DE LAS IMÁGENES Y OBTENCIÓN DE SERIES DE TIEMPO

Una vez obtenidos los parámetros de la cámara, se extraen las imágenes individuales desde los registros de video para los dos casos presentados en la Tabla 1. La frecuencia de operación de las cámaras es de 30 Hz (30 cuadros por segundo) y se debe realizar la rectificación de cada una de las imágenes. Una vez rectificadas las imágenes de video, se seleccionan un total de 11 perfiles verticales ($x=cte.$) para cada caso de oleaje, para proceder a obtener las series de tiempo de la superficie libre. El resultado es una imagen espacio-temporal de la superficie libre para cada uno de los perfiles, como se puede apreciar en la Figura 3a. Dicha imagen se analiza mediante filtros, primero transformando la imagen RGB (rojo-verde-azul) a una imagen binaria (negro-blanco), asignando el valor 1 si el pixel es negro y el valor 0 si el pixel es blanco (Figura 3b). Luego, para cada instante temporal se busca en la vertical el cambio de valor de 1 a 0, correspondiente a la posición de la superficie libre. Transformando dichas coordenadas de pixeles a coordenadas reales, se obtiene la serie de tiempo de la columna de agua respecto al fondo del canal, a la cual se le resta la profundidad de agua estática para finalmente obtener la serie de tiempo de la superficie libre (Figura 3c y 3d).

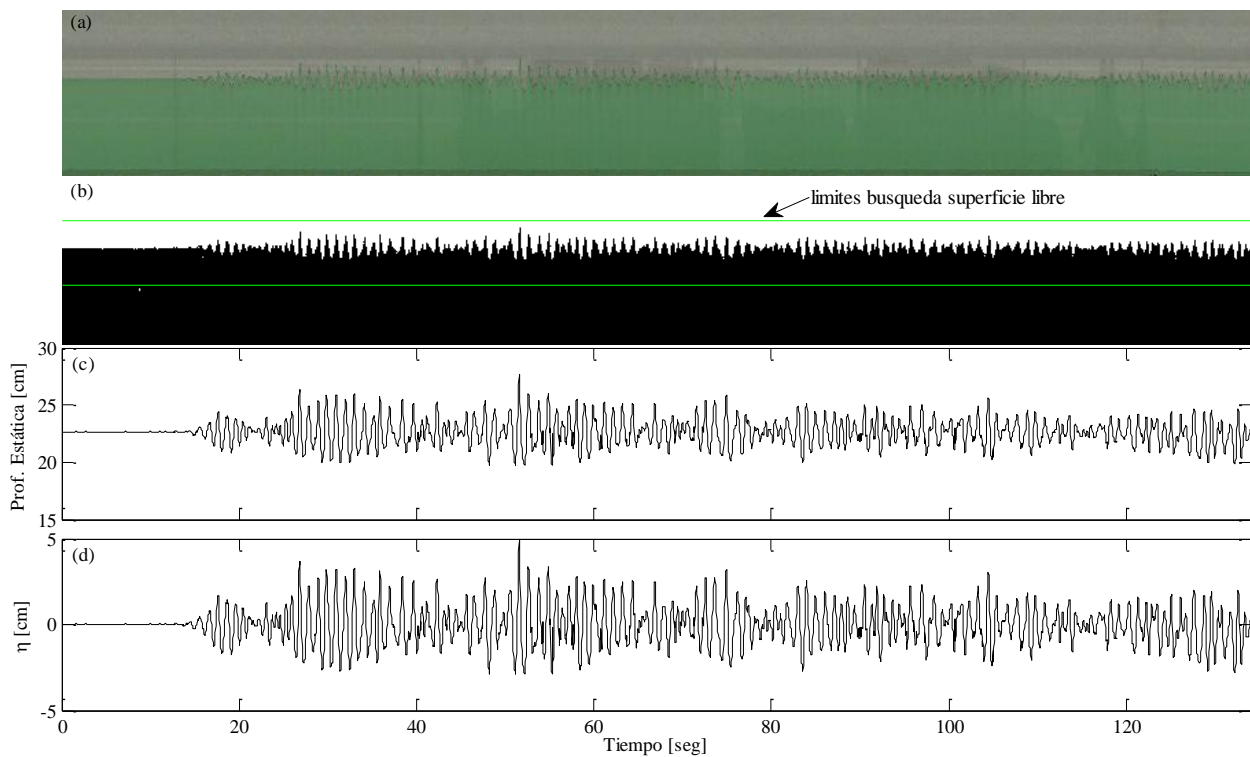


Figura 3. Procedimiento de filtrado de imágenes perfil 1 oleaje irregular: (a) Perfil 1 RGB para cada instante. (b) Perfil 1 transformado a imagen binaria, límites de búsqueda de superficie libre (verde). (c) Serie de tiempo profundidad de agua estática perfil 1 en [cm]. (d) Serie de tiempo superficie libre perfil 1 en [cm].

La Figura 4 muestra la ubicación a lo largo del canal de los distintos perfiles utilizados, y la Figura 5 muestra las series de tiempo obtenidas para cada uno de ellos. Se puede apreciar el desfase entre las series de tiempo (Figura 5a), debido al tiempo de viaje de las ondas (regulares e

irregulares) a lo largo del canal. Para determinar la magnitud de dichos desfases se realiza un análisis de auto-correlaciones cruzadas entre los distintos perfiles. Una vez determinados los desfases de cada una de las series, se realizó la corrección temporal con el fin de considerar el mismo número de olas en el análisis posterior. Es importante notar que esto implícitamente asume que efectos no lineales son despreciables. Las series corregidas se analizan luego para contrastar con la teoría de oleaje.

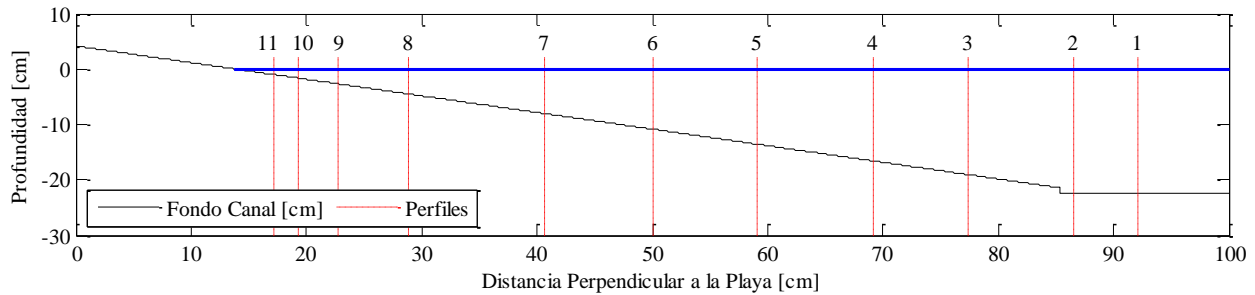


Figura 4. Ubicación perfiles utilizados.

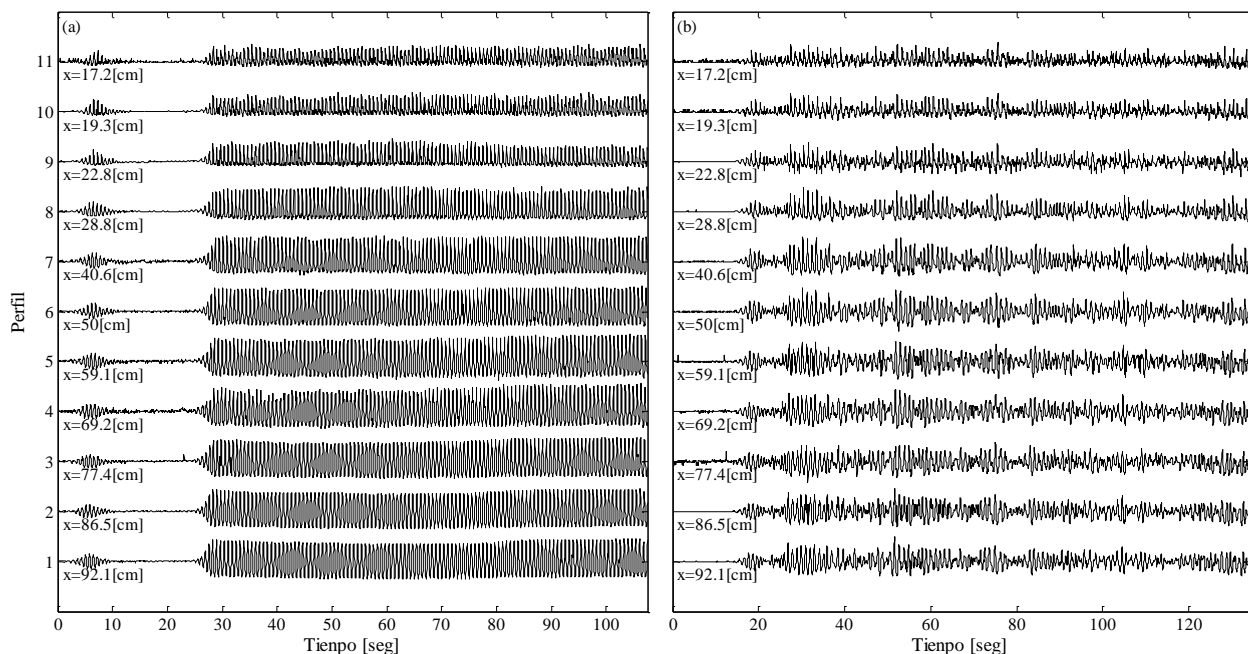


Figura 5. Series de tiempo perfiles: (a) Superficie libre (η) Perfiles oleaje regular. (b) Superficie libre (η) Perfiles oleaje irregular. Distancia medida respecto a la costa.

Cabe destacar que el procedimiento descrito es posible de ser aplicado de igual forma a otros fenómenos físicos en el canal, por lo que en lo siguiente se presenta un análisis como prueba de concepto.

5. TEORÍA DE OLEAJE: ALTURA DE OLA Y SET-UP

5.1 VALORES EXPERIMENTALES

El primer paso para el análisis de la serie de tiempo es calcular los parámetros estadísticos básicos, es decir, altura de ola, periodo y el nivel medio. El nivel medio del oleaje ($\bar{\eta}$), o set-up, corresponde al promedio de la serie de tiempo de la superficie libre (η). Los parámetros restantes pueden ser estimados acorde a Goda (2000). Así, la altura media cuadrática se define como:

$$H_{rms} = \sqrt{8m_0} \quad (7)$$

donde m_0 , corresponde a la varianza de la serie de superficie libre, que se puede estimar de la siguiente forma

$$m_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2 \quad (8)$$

Por otro lado, si realiza un análisis espectral discreto de la serie de tiempo de acuerdo a Holthuijsen (2007), m_0 se define como:

$$m_0 = \frac{1}{\Delta f} \sum_{i=1}^{N/2+1} S(f_i) \quad (9)$$

donde Δf es el diferencial de frecuencia en [Hz], correspondiente a la razón entre el intervalo de tiempo entre cada dato (Δt) en segundos y el número de datos de la series (N), y $S(f_i)$ es la función de densidad espectral en unidades de [cm²/s].

Finalmente, el periodo peak ($T_p = 1/f_p$), es aquel periodo asociado a la frecuencia para la cual la función de densidad espectral registra su mayor valor. Cabe notar que todas estas cantidades son derivadas a partir de las imágenes.

5.2 VALORES TEÓRICOS

La variación del nivel medio se determina mediante la ecuación de momentum en la dirección perpendicular a la costa (ya que el canal es angosto y se puede asumir oleaje unidireccional).

Como se detalla en Longuet-Higgins y Stewart (1964), el gradiente de presión debido a la fluctuación del nivel medio ($\bar{\eta}$) es compensado por una variación de los tensores de radiación (S_{xx}), de forma que es posible obtener:

$$\rho g (h + \bar{\eta}) \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} = - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} \quad (10)$$

donde S_{xx} depende de la energía de la ola (por unidad de ancho, E_w), la velocidad a la cual se propaga dicha energía (c_g) y su celeridad individual (c). De esta forma,

$$S_{xx} = E_w \left(2 \frac{c_g}{c} - \frac{1}{2} \right) \quad (11)$$

donde la energía del oleaje y la velocidad de grupo se obtienen directamente desde la teoría lineal,

$$E_w = \frac{1}{8} \rho g H_{rms}^2 \quad (12)$$

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kh}{\sin(2kh)} \right) \quad (13)$$

La celeridad (c) de la ola corresponde a la razón entre la longitud de onda ($L = 2\pi / k$) y el periodo (T). La longitud de onda L se obtiene resolviendo la ecuación de dispersión del oleaje,

$$\sigma^2 = \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = gk \tanh(kh) \quad (14)$$

Por otro lado, la estimación de la altura de ola se realiza mediante un modelo paramétrico de evolución de oleaje. Thornton y Guza (1983) propusieron un modelo de propagación basado en la conservación del flujo energético (ec. 15), considerando dos fuentes de disipación de energía; la primera corresponde a la disipación por rotura del oleaje (ε_b , Ec. 16), mientras que la segunda corresponde a disipación de energía por fricción de fondo (ε_f , Ec. 17). Ambas fuentes de disipación son incluidas mediante formulaciones ad-hoc. La disipación por rotura es incorporada mediante analogía con un resalto hidráulico en movimiento, o bore. El modelo aplica tanto a oleaje regular como irregular, describiendo estadísticamente la cantidad de olas que rompe (y por tanto disipa) en cada posición mediante una distribución de probabilidad empírica (aunque basada en la distribución Rayleigh). Es importante mencionar, que este modelo no logra reproducir el efecto de retardo en la variación del nivel medio del oleaje, ya que no incorpora la disipación de energía por roller. Según lo anterior, las ecuaciones del modelo corresponden a:

$$\frac{\partial (E_w c_g)}{\partial x} = \varepsilon_b + \varepsilon_f \quad (15)$$

$$\varepsilon_b = \frac{3\sqrt{(\pi)}}{16} \rho g B^3 f \frac{H_{rms}^5}{\gamma^2 h^3} \left(1 - \frac{1}{(1 + (H_{rms}/\gamma h)^2)^{5/2}} \right) \quad (16)$$

$$\varepsilon_f = \rho c_f \frac{1}{16\sqrt{(\pi)}} \left(\frac{2\pi f H_{rms}}{\sinh(kh)} \right)^3 \quad (17)$$

donde c_f es el coeficiente de fricción de fondo, γ y B son parámetros de ajuste. En la zona de rompiente, la disipación por fricción de fondo es mínima, por lo que esta puede ser despreciada.

Mediante las ecuaciones presentadas (Ec. 10 a Ec. 17), es posible obtener simultáneamente la altura de ola (H_{rms}) y el nivel medio de la superficie libre mediante un esquema de diferencias finitas. En primer lugar, a partir del modelo de evolución se obtiene la altura de ola (calibrando los parámetros necesarios). Luego, a partir de la altura de ola es posible estimar la energía del oleaje, y a su vez los esfuerzos de radiación. Entonces, desde la ecuación de momentum (Ec. 10) se obtiene el perfil del nivel medio de la superficie libre. Finalmente, con estos valores se corrigen los valores de profundidad en la ecuación de dispersión, corrigiendo así los valores de celeridad y velocidad de grupo. Estos valores son ingresados nuevamente al modelo de propagación de oleaje y el procedimiento se repite hasta que los valores de altura de ola y nivel medio convergen.

Por otro lado, dos coeficientes permiten analizar la no linealidad del oleaje, correspondientes al coeficiente de asimetría (A_s) (Ec. 18) y el wave skewness (S_k) (Ec. 19). El primero cuantifica la asimetría del oleaje respecto al eje vertical, en tanto que el segundo cuantifica la asimetría respecto al eje horizontal. Estos parámetros se cuantifican según:

$$A_s = \frac{\overline{H(\eta - \bar{\eta})^3}}{\left(\overline{H(\eta - \bar{\eta})^2} \right)^{3/2}} \quad (18)$$

$$S_k = \frac{\overline{(\eta - \bar{\eta})^3}}{\left(\overline{(\eta - \bar{\eta})^2} \right)^{3/2}} \quad (19)$$

donde H corresponde a la transformada de Hilbert del argumento.

6. RESULTADOS

La Figura 6 muestra los espectros obtenidos de los 11 perfiles analizados para ambos casos de oleaje. Se puede apreciar que los espectros medidos tienen bastante coherencia, ya que para el oleaje regular, la frecuencia pico obtenida es la misma frecuencia de la paleta generadora de oleaje (1.4 [Hz]). Al comparar los dos casos se puede apreciar que el oleaje irregular registra energía en un rango de frecuencias mucho más amplio que el oleaje regular, consistente con el espectro JONSWAP ingresado. Sin embargo, a medida que se aproxima al punto de rotura (hacia el perfil 11), se aprecia la aparición de un segundo armónico, correspondiente a una frecuencia cercana al doble de la frecuencia pico, la que se conserva claramente una vez ocurrido el rompimiento, el cual ocurre aproximadamente en el perfil 7, es decir, $x=40.6$ [cm] (ver Figura 7). Este fenómeno es producto de la generación de oscilaciones armónicas acopladas producto de la transformación del oleaje desde un fenómeno armónico-sinusoidal, a una señal no lineal. Esto resalta la capacidad del sistema de medición de capturar con precisión suficiente variaciones del comportamiento de la superficie libre.

A continuación, se calculan los parámetros del oleaje ($H_{rms}, T_p, \bar{\eta}, A_s, S_k$) de las series de tiempo de los perfiles para ambos casos de oleaje. También, se estiman los perfiles de H_{rms} y $\bar{\eta}$ mediante el esquema de diferencias finitas descrito en la Sección 4, considerando como condiciones de borde los valores de H_{rms} y $\bar{\eta}$ del perfil 1, más cercano a la paleta. De forma adicional, se estima el perfil de $\bar{\eta}$ de forma similar al modelo teórico, pero con la diferencia que H_{rms} se estima mediante interpolación lineal de los valores medidos en los perfiles.

En la Figura 7 se muestran los resultados para ambas corridas de oleaje. Se aprecia que los perfiles H_{rms} y $\bar{\eta}$ obtenidos por medio del modelo propuesto por Thornton y Guza (1983) se ajustan de forma aceptable a los datos medidos mediante imágenes de video. Por otro lado, los perfiles $\bar{\eta}$ obtenidos por medio de interpolación lineal del perfil medido de H_{rms} , reproducen el set-down y set-up de forma aceptable, lo que se traduce en una verificación experimental de la Ec. (10). Es posible apreciar que ambos modelos subestiman el set-down y sobrestiman el set-up, posiblemente porque las ecuaciones usadas no consideran el efecto de la disipación de energía del roller (volumen agua-aire turbulento que aparece al iniciar la rotura). Lo anterior se aprecia en los perfiles de H_{rms} , donde para el modelo de Thornton y Guza (1983) el proceso de peralte del oleaje se produce de forma más atenuada, de forma que la rotura ocurre más cerca de la costa y la disminución de altura producto de la disipación es más brusca que para los datos medidos. Además, se observa que la metodología presentada logra capturar de forma adecuada los procesos no lineales del oleaje, ya que tanto para el coeficiente de asimetría como skewness se observa un aumento a medida que el oleaje asomera y se aproxima a la rotura, para luego disminuir una vez que está ocurre.

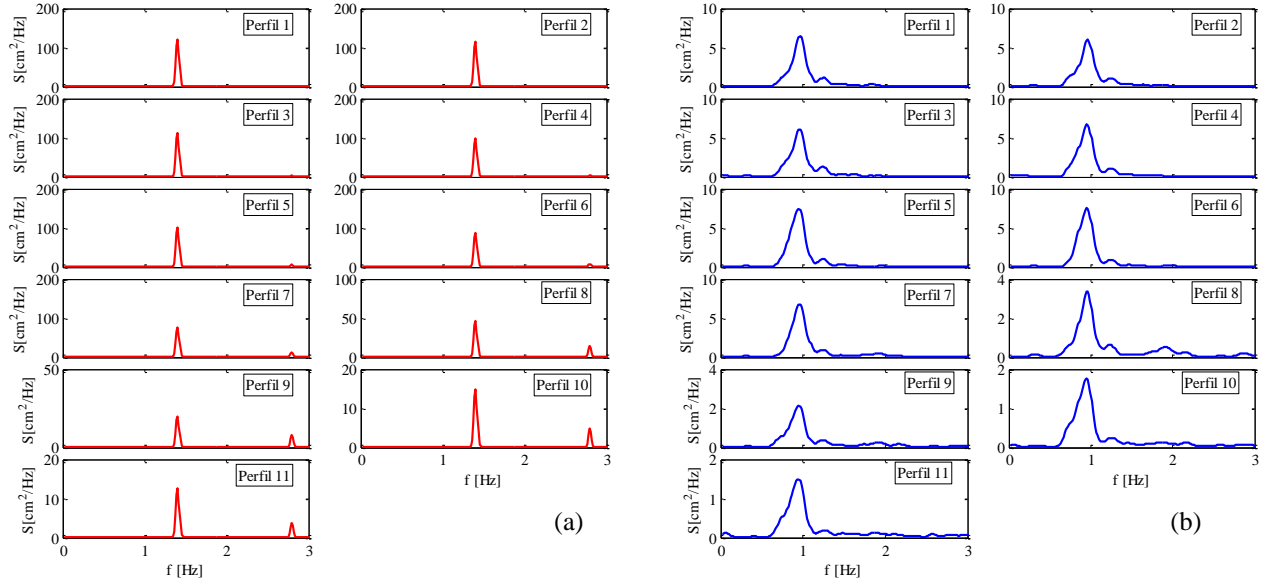


Figura 6. Espectros perfiles (S [cm^2/s]): (a) oleaje regular (línea roja continua). (b) oleaje regular (línea azul continua).

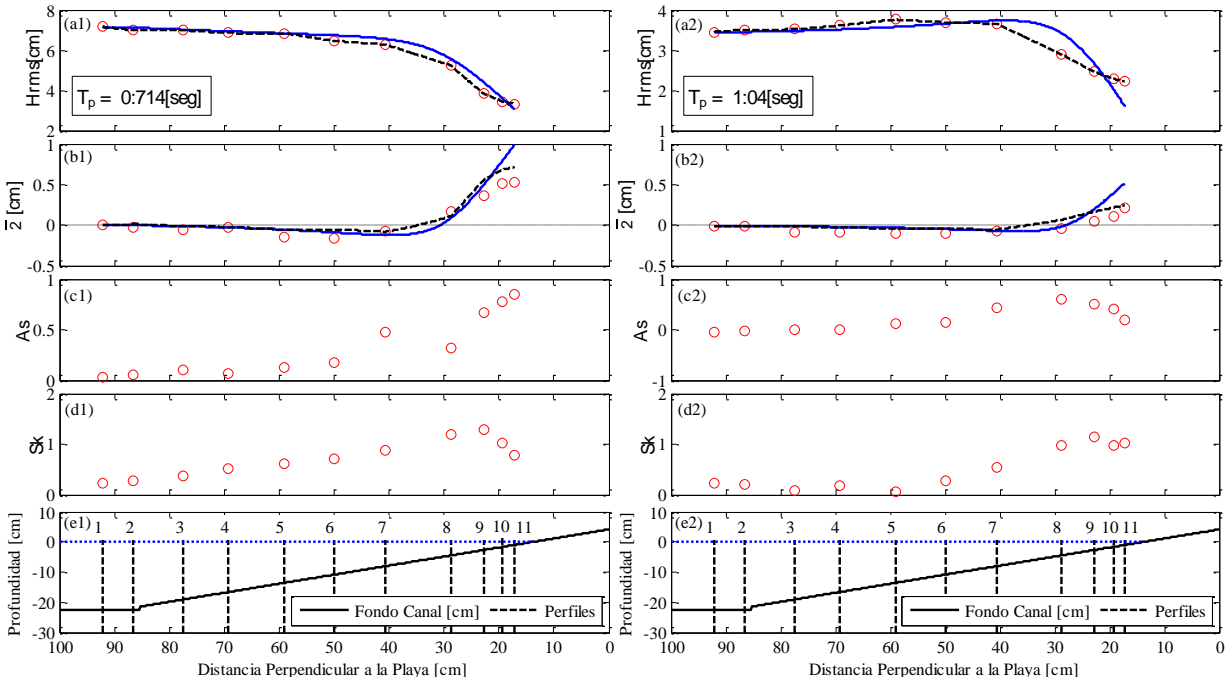


Figura 7. Perfiles medidos y modelados para (a1) H_{rms} Oleaje regular. (a2) H_{rms} Oleaje irregular. (b1) $\bar{\eta}$ Oleaje regular. (b2) $\bar{\eta}$ Oleaje irregular. (c1) Asimetría oleaje regular. (c2) Asimetría oleaje irregular. (d1) Skewness oleaje regular. (d2) Skewness oleaje irregular. (e1) Profundidad agua oleaje regular. (e2) Profundidad agua oleaje irregular. Medidos (círculos), Modelados con Thornton y Guza: oleaje regular ($B = 0.8$ y $\gamma = 0.9$), oleaje regular ($B = 1$ y $\gamma = 0.5$) (línea azul continua), modelados con interpolación lineal H_{rms} (línea negra discontinua).

7. CONCLUSIONES

Los objetivos de este trabajo son analizar mediante imágenes de video el oleaje generado en un canal hidráulico con fondo variable y establecer una metodología para el procesamiento de las imágenes de video que permita extraer información cuantitativa a bajo costo.

Luego de comparar con modelos teóricos, se determina que las mediciones obtenidas a partir del procesamiento del registro de imágenes son consistentes con los procesos de transformación que experimenta el oleaje a medida que se propaga a través de batimetría variable hacia la costa (alturas de ola, set-down y set-up), validando así el método de detección propuesto.

Como trabajo futuro, se extenderá la metodología y automatizará la teoría de rectificación descrita de modo de facilitar su aplicación a múltiples fenómenos hidráulicos, por ejemplo, medición de carga en vertederos y calibración de curvas de descarga o mediciones de profundidad de escurrimiento en resaltos. De esta forma, el trabajo aquí presentado constituye un aporte directo a la docencia de la ingeniería hidráulica, reduciendo el costo en la adquisición de instrumentos, que en muchas ocasiones puede resultar prohibitivo. Adicionalmente, el contar con el registro de video permite que el estudiante pueda visualizar claramente el fenómeno físico a la vez que realiza la medición de él, con una precisión aceptable y a una resolución y discretización que son fácilmente definidas por él.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece por el financiamiento de los estudios de postgrado a CONICYT-PCHA/Magíster Nacional/2013 – 221320628, a CONICYT a través de FONDAP 15110017, y FB 0821.

REFERENCIAS

Goda Y. 2000. Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 15. World Scientific, Singapore.

Heikkilä J., y O. Silvén. 1997. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction. Infotech Oulu and Department of Electrical Engineering University of Oulu, Finland.

Holthuijsen L.H. 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, Cambridge,

Longuet-Higgins M.S., y R.W. Stewart. 1964. Radiation stress in water waves; a physical discussion with applications. Deep-Sea Research, 11, 529-562.

Thornton, E.B., y R.T. Guza. 1983. Transformation of wave height distribution. Journal of Geophysical. Research, 88(C10), 5925-5938.