

## 5.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- 1) Ayala Luis, "Diseño Hidráulico de Puentes" CRH 83 - 13- 3, UCH, 1983.
- 2) Vega, Solano, "Modelo teórico de socavación general y local en lechos granulares gruesos", II Congreso Nacional de Hidráulica, 1973.
- 3) Froehlich David, "Armor-Limited Clear-Water Contraction Scour at Bridges" Journal of Hydraulic Engineering, June 1995.
- 4) Raudkivi, A, J "Loose Boundery Hydraulics" Pergamon Press, 1976.
- 5) Meyer-Peter, E.; Muller, R. "Formulas for Bed load transport". 2nd Conference International Association of Hydraulic Rearch, Stockholm, Sweden, 1948.
- 6) Maza A.,J, "Cambios que Sufre un Río Aguas Abajo de Grandes Presas", Rev. Lat. Hidr., N°1, 1987.
- 7) 4C Ingenieros, "Estudio Hidrológico, Hidráulico y Mecánico Fluvial, Estero Viña del Mar. Interconexión Vial Santiago-Valparaiso-Viña del Mar" Unidad Ejecutiva Concesiones de Carreteras, MOP, 1999.
- 8) 4C Ingenieros, "Determinación de Caudales de Diseño y Socavaciones, Cruce Gasoducto de Energas S.A., bajo Estero Reñaca, Viña del Mar" ENERGAS S.A. 1998.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que el método propuesto presenta los entesados más los métodos de Froehlich y Sedoviev, para la estimación de la socavación. El método propuesto se basa en el concepto de esfuerzos tangenciales críticos, lo cual se considera al menos explicitamente. El método propuesto se basa en el concepto de esfuerzos tangenciales críticos, lo cual se considera al menos explicitamente. El método propuesto se basa en el concepto de esfuerzos tangenciales críticos, lo cual se considera al menos explicitamente.

Asimismo, presenta con respecto al método de Froehlich, que se basa en el concepto de esfuerzos tangenciales críticos y el efecto de socavamiento en el fondo del río. Se desprende de una serie de hipótesis desarrolladas dentro de este método una solución numérica.

## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

### XIV CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

## PROCESOS TURBULENTOS INTERVINIENTES EN LA TRANSICION RIZO-DUNA

FERNANDEZ, R.<sup>1</sup>  
LÓPEZ, F.<sup>1</sup>  
BEST, J.<sup>2</sup>

## RESUMEN

El presente trabajo estudia experimentalmente la evolución espacio-temporal de la estructura del flujo medio y de la turbulencia durante el proceso de amalgamamiento en la transición de formas de fondo de rizados a dunas. Se estudiaron tres configuraciones diferentes mediante la adquisición de velocidades bi-dimensionales empleando un anemómetro láser Doppler (LDA) operando en modo *backscatter*. Una grilla de alta definición espacial, refinada en la región de recirculación, permitió la resolución de las alteraciones al campo de velocidades resultante. Los resultados obtenidos muestran claramente la influencia del proceso de amalgamamiento sobre los principales términos de la ecuación de balance de energía cinética turbulenta, con la existencia de importantes picos localizados de producción y sustanciales flujos verticales turbulentos de energía cinética. La estructura clásica de eventos coherentes en capas límites resulta asimismo modificada con predominancia de eventos de barrido (*sweeps*) en la generación de esfuerzos de corte turbulentos cerca del lecho aguas arriba de la cresta del rizo siguiente a la nueva forma de fondo. Estas alteraciones serían suficientes para desencadenar el proceso de transición de rizados a dunas a partir del amalgamamiento de dos formas de fondo menores.

<sup>1</sup> Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (CIRSA) – Universidad Nacional de Córdoba. CONICET, Ambrosio Olmos 1142, (5000) Córdoba, Argentina; email: flopez@com.uncor.edu

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Leeds, Reino Unido. LS2 9JT, UK.

## INTRODUCCIÓN

La imposición de un esfuerzo de corte,  $\tau^*$ , mayor al crítico sobre un lecho granular móvil, no-cohesivo, genera procesos de transporte incipientes, evolucionando hacia la progresiva generación de formas de fondo a medida que se incrementa el valor de  $\tau^*$ . Numerosos diagramas de fase han sido elaborados a los fines de definir y graficar el tipo de forma de fondo que prevalece ante ciertas condiciones de diámetro de sedimento y esfuerzo de corte actuante sobre el lecho. Estos diagramas representan básicamente escenarios de formas de fondo estables. Por ejemplo, rizos resultan estables para sedimentos en un rango que se extiende desde el limo a los 0.7 mm de diámetro. Para la formación de los mismos, es condición necesaria la existencia de un fondo hidráulicamente liso, con las partículas de sedimento inmersas en la subcapa viscosa. Tanto la altura como la longitud de onda de los rizos resultan independientes de la profundidad del flujo, y luego de un tiempo evolucionan a formas tridimensionales (Baas, 1993). Los rizos han sido considerados como formas de fondo que se encuentran a escala con el diámetro medio del sedimento,  $D_s$ , de tal manera que su longitud de onda resulta aproximadamente  $\lambda_r \sim 1000 D_s$ . Sin embargo, es también aceptado, que este parámetro depende de las dimensiones de la zona de recirculación, la cual a su vez queda determinada por la velocidad del flujo y la altura del rizo (Karahán y Peterson, 1980). En cuanto a la génesis de los rizos, ésta ha sido atribuida a numerosos mecanismos, de los cuales el más aceptado quizás sea la existencia de una zona de separación advectada aguas abajo de un evento de barrido (Best, 1996).

Por otra parte, las dunas propiamente dichas resultan de rizos y dunas bidimensionales a medida que el esfuerzo de corte aplicado se incrementa. Las dunas poseen numerosas características distintivas: (1) interactúan en forma más directa con la superficie libre del agua que los rizos; (2) su altura ha sido encontrada como una función de escala del tirante del escurrimiento (Jackson, 1976; Yalin, 1977), así como también, su longitud de onda, de tal manera que  $\lambda_d \sim 5-9 Y$ , donde  $Y$  es el tirante; (3) poseen una forma más regular que las dunas bidimensionales; (4) constituyen formas de fondo de mayor magnitud que los rizos, aunque con perfiles asimétricos similares. Las formas de fondo denominadas dunas han sido encontradas en presencia de una variada granulometría de fondo, desde arenas finas hasta gravas. Asimismo, diferentes mecanismos e hipótesis han sido propuestos para explicar la génesis y el posterior desarrollo de dunas, siendo quizás el más divulgado el amalgamamiento, proceso por el cual dos formas de fondo se "fundan" constituyendo una mayor. El flujo de sedimento suspendido puede incrementar significativamente el tamaño de estas dunas en arenas muy finas. Sin embargo, el mecanismo principal de crecimiento de la duna debe ligarse al transporte de arrastre de fondo, el cual producirá dunas en presencia de arenas y gravas.

El proceso de amalgamamiento de formas de fondo, considerado responsable de la migración, morfología, origen y estabilidad de rizos y dunas, sigue siendo un problema crítico de investigación. En efecto, aún resta definir y caracterizar acabadamente cómo este proceso interactúa con la dinámica del flujo, alterando la estructura básica del mismo, lo cual a su vez influencia de manera directa los mecanismos de generación y estabilidad de formas de fondo al generar mayores erosiones en la zona de recirculación, aumentando el transporte de sedimentos y creando entonces las condiciones necesarias para la formación de una duna (Costello y Southard, 1980).

Diversas investigaciones recientes han contribuido a clarificar sustancialmente la interacción entre las estructuras coherentes del flujo y la dinámica del transporte de sedimento en estados incipientes de movimiento (García, López y Niño, 1995). Adicionalmente, se ha demostrado que la coherencia se manifiesta en la aparición cuasi-periódica de eventos intermitentes, tanto en el espacio como en el tiempo, de los cuales, los más estudiados se relacionan con las estrias de baja y alta velocidad en subcapas viscosas, los vórtices de horquilla, las superficies de corte inclinadas, los eventos conocidos como *bursts* (o eyecciones) y *sweeps* (o eventos de barrido), etc. La ocurrencia de estos eventos coherentes guarda una estrecha relación con la dinámica de la turbulencia.

En la actualidad, el mecanismo de 'feedback' entre la rugosidad del lecho y el rol de las estructuras coherentes del flujo, tanto en el desarrollo inicial de formas de fondo como en la interacción entre formas de fondo completamente desarrolladas, es comprendido sólo superficialmente, impidiendo por lo tanto, la incorporación de mecanismos físicos más realistas en los modelos numéricos de flujos turbulentos en diferentes ambientes. En particular, la interacción entre las regiones de flujo asociadas con la rugosidad de grano o de forma de fondo no se encuentra completamente comprendida, y poco es lo que actualmente se conoce acerca de la evolución espacio-temporal de estas interacciones.

En este trabajo se presentan resultados de un estudio experimental realizado en el Laboratorio Sedimentológico del Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Leeds. El objetivo específico de la investigación fue el de estudiar las alteraciones al campo de flujo medio y de la turbulencia, así como a las estructuras coherentes, inducidas por el amalgamamiento en la transición rizo-duna, analizando los resultados en el marco de los procesos dominantes para el transporte de sedimentos.

## INFRAESTRUCTURA EXPERIMENTAL

Para el desarrollo de los experimentos se empleó un canal de laboratorio de 12 m de longitud, 0.30 m de ancho y 0.30 m de alto, del Laboratorio Sedimentológico de Dinámica de Fluidos, Departamento de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Leeds, Reino Unido. Las mediciones de velocidad fueron realizadas con un anemómetro láser Doppler (LDA) bidimensional DANTEC con fibra óptica, operado en modo "back-scatter". El flujo fue sembrado con partículas de pintura blanca al agua, las cuales proveyeron una excelente fuente de rebote de ondas electromagnéticas, permitiendo alcanzar frecuencias de muestreo en el rango 50 a 300 Hz. La fibra óptica fue montada sobre un sistema posicionador de alta precisión controlado digitalmente, lo cual permitió ubicar el volumen de medición con una precisión de  $\pm 0.1$  mm, permitiendo la definición de una grilla de medición lo suficientemente densa y precisa, según se indica más abajo. El perfil longitudinal del lecho, constituido por formas de fondo, y el de la superficie libre fueron relevados mediante limnómetros de aguja luego de cada corrida completa.

Para la definición de la longitud del registro en cada punto se adquirieron series de velocidades bidimensionales a diferentes distancias del lecho de 10 minutos de duración cada una, a una tasa de muestreo promedio de 130 Hz. Estas series fueron procesadas a los fines de determinar



tiempos mínimos de medición compatibles con errores aceptables en el cómputo de momentos centrales de cuarto orden. De este procedimiento surgió la selección de un tiempo constante de adquisición para todos los puntos de la grilla de medición de dos minutos.

## METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se efectuaron ensayos sobre un total de tres configuraciones experimentales del lecho, denominadas en adelante *RUNI*, *RUNII* y *RUNIII*, en condiciones de flujo uniforme y permanente, empleando un tirante de 10cm. Para *RUNI* se simuló un fondo de rizo uniforme y totalidad del lecho del canal de ensayos con un tren periódico de formas de fondo metálicas, bidimensionales y triangulares de 30 cm de longitud y una altura  $h_s = 1.5$  cm, o sea una relación de aspecto de 20, con una longitud de onda de  $\lambda = 30$  cm. Con el objetivo de caracterizar las estructuras coherentes turbulentas inducidas por la evolución de formas de fondo durante el proceso de amalgamamiento en la transición rizo-duna, se diseñó una forma triangular más pequeña, de 1cm de altura y unos 10cm de longitud ( $\lambda/h = 30$ cm). En la corrida denominada *RUNIII* esta forma de fondo menor se superimpuso sobre la forma de fondo del lecho en la sección de medición, de tal manera que la cara de aguas abajo de la cresta del rizo existente se continuara con esta nueva forma triangular. En *RUNII* se desplazó esta forma de fondo menor sobre la cara de aguas arriba del rizo original, localizándola a unos 3.0cm de su cresta, es decir simulando un estado intermedio en el proceso de amalgamamiento.

Para las mediciones con el LDA se definió una grilla que poseyó entre 26 y 30 perfiles verticales (la cantidad dependiente de la configuración) con espaciamiento variable, densificados en zonas de interés, y contando cada uno con unos 20 puntos de medición. De esta manera, cada configuración consistió en una grilla de aproximadamente 600 puntos de medición, donde en cada uno se midieron las componentes longitudinales y verticales de velocidad. Como se mencionó, mediciones preliminares, previas a los experimentos propiamente dichos, indicaron el empleo de longitudes de registro mayores o iguales a los 180 segundos para poder resolver estadísticos de velocidad de cuarto o quinto orden.

## PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Para la presentación de los resultados se seguirá la siguiente nomenclatura:  $\{u, w\}$  representarán valores instantáneos de velocidad según el sistema Cartesiano  $\{x, z\}$ , siendo  $x$  el eje longitudinal con sentido positivo en la dirección del flujo, y  $z$  el vertical positivo hacia arriba. Los valores medios de velocidad se representarán con letras mayúsculas ( $U, W$ ), mientras que las primas se emplearán para designar fluctuaciones de velocidad respecto al valor medio ( $u', w'$ ).

Los datos de velocidad bidimensional medidos fueron procesados a fin de caracterizar la estructura del flujo medio y de la turbulencia inducida durante la transición rizo-duna por amalgamamiento, así como definir las principales propiedades y escalas propias de los eventos turbulentos coherentes -eyecciones y *sweeps*- asociados durante este proceso.

**Estructura de Flujo Medio:** La configuración de la corriente sobre un lecho de rizados triangulares es el resultado de la separación del flujo luego de la cresta del rizo, su posterior reenganche y el

inicio de una nueva capa límite en presencia de aceleraciones inducidas por efectos geométricos. En la Figura 1 se presenta el campo de velocidades medias correspondiente a las tres configuraciones estudiadas, donde puede claramente observarse la influencia de una mayor forma de fondo sobre la región de recirculación generada aguas abajo de la cresta. Puede advertirse como la nueva forma de fondo altera el campo original de velocidades medias, induciendo mayores regiones de recirculación. La dimensión horizontal de éstas ha sido estimada en  $x/h_s = 3.8, 5.04$  y  $5.6$ , para *RUNI*, *RUNII* y *RUNIII*, respectivamente. Éste último valor resulta un 38% mayor que lo típicamente observado en trenes periódicos de dunas (Kadota y Nezu, 1999), lo cual se atribuye a la existencia de menores aceleraciones inducidas por geometría durante el amalgamamiento.

En particular, resulta interesante destacar la existencia de una zona de recirculación unificada durante el amalgamamiento, la cual comprende la correspondiente a la forma de fondo menor y a la original. En este sentido, es de esperar que la interacción de dos estelas conduzca a picos localizados de energía cinética turbulenta y de producción de difusividad turbulenta (ver más adelante). Asimismo es de notar que el flujo aguas arriba del amalgamamiento permanece inalterado durante el proceso.

**Estructura de la Turbulencia:** De igual manera, la estructura de la turbulencia se ve alterada sustancialmente por esta forma de fondo. A fin de analizar en particular estos efectos presentaremos primero algunos resultados de la estructura de las principales variables que caracterizan la turbulencia, para luego analizar en mayor detalle las alteraciones a las escalas típicas de eventos organizados o coherentes.

La Figura 2 compara el campo de intensidades turbulentas longitudinales (desvío estándar de la serie de  $U, u_{rms}$ ), para las tres configuraciones estudiadas. Tal como se mencionó anteriormente, puede advertirse cómo en el proceso de amalgamamiento se produce efectivamente un incremento de las intensidades turbulentas en la región de aguas abajo de la nueva forma de fondo, mientras que las mismas permanecen inalteradas aguas arriba de la misma. Asimismo las intensidades turbulentas no sólo crecen en magnitud sino también en su escala espacial de influencia, alcanzando valores importantes aún cerca de la cresta del rizo inmediatamente aguas abajo del amalgamamiento. En particular, merecen destacarse los picos detectados durante el proceso en estados intermedios cuando la forma de fondo menor se encontraba en la cara de aguas arriba del rizo original (*RUNII*). Una estructura similar a ésta puede observarse para el resto de los componentes del tensor de esfuerzos de Reynolds. En efecto, la Figura 3 ilustra en líneas de contorno el campo de valores  $-uw$ , donde puede observarse un sustancial incremento de la difusividad turbulenta vertical de cantidad de movimiento longitudinal durante el proceso de amalgamamiento afectando importantes regiones aguas abajo de la zona afectada.

Considerando en conjunto a las Figuras 1 y 2 puede observarse que la localización de los valores picos de los elementos del tensor de Reynolds coinciden con la ubicación de los puntos de inflexión del perfil de  $U$ . Más aún, estos picos se encuentran ubicados levemente por encima de la cresta para luego descender aguas debajo de la misma.

De estas figuras resultan evidentes asimismo las alteraciones al campo turbulento en la vertical, que generan el paulatino desplazamiento hacia la superficie libre de condiciones de unidimensionalidad en inmediaciones de la cresta. Esto también puede observarse en la Figura 4 que muestra la evolución del flujo vertical de energía cinética turbulenta ( $F_{TKE} = 1/2(u'^2 w' + v'^2 w' + \overline{w'^3})$ ). Por una parte, se observa la existencia de un importante gradiente de  $F_{TKE}$  con cambio de su signo en coincidencia con la capa de corte (*shear layer*) generada aguas abajo de la cresta, con flujos turbulentos de energía cinética positivos (hacia la superficie libre) por encima de esta capa de corte, y flujos negativos (dirigidos hacia el lecho) por debajo de la misma. Esta particular estructura sugiere la existencia de regiones con concentraciones importantes de producción de energía cinética turbulenta, tal como puede observarse en la Figura 5. En particular este incremento de producción resulta evidente en estadios intermedios del proceso de amalgamamiento, donde se advierten picos de producción de energía cinética que superan en un factor de tres a los correspondientes a estados iniciales y finales. Notoriamente no se observa la existencia de producciones localizadas de turbulencia en la cara de aguas arriba del siguiente rizo, lo que unido a la estructura antes presentada del tensor de esfuerzos de Reynolds, lleva a concluir que existen importantes advecciones de energía cinética turbulenta hacia aguas abajo de la cresta.

Toda estas alteraciones a la estructura del campo turbulento inducidas por una forma de fondo mayor a la media se manifiestan asimismo en el campo de presiones asociado. En efecto, las aceleraciones/desaceleraciones locales inducidas afectan a las desviaciones del campo de presiones respecto al hidrostático, las que pueden ser calculadas siguiendo la metodología descrita en Kadota y Nezu (1999):

$$\frac{\Delta P(z)}{\rho} = \frac{P(z)}{\rho} - g \cdot \cos \theta (h - z) \quad (1)$$

$$= \int_z^h \frac{\partial}{\partial x} (UW + \overline{uw}) dz + [W^2 + \overline{w^2}]_z^h \quad (2)$$

donde  $P$  es la presión total,  $h$  el tirante medio de escurrimiento,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $\rho$  la densidad del agua. Se deduce de la ecuación que la diferencia de presión dinámica  $\Delta P$  está afectada por la variación de la componente vertical de la velocidad. Los resultados correspondientes se presentan en la Figura 6, donde pueden observarse distribuciones de  $\Delta P$  similares a las de un tren de dunas (Kadota y Nezu, 1999), pero con menores efectos de aceleraciones inducidas por geometría.

**Estructura de Eventos Coherentes:** Complementariamente a la estructura descrita de la turbulencia se abordó la caracterización de los eventos turbulentos coherentes asociados al proceso de amalgamamiento. En particular se buscó detectar alteraciones al campo original en aquellas regiones cercanas al rizo de aguas abajo de la nueva forma de fondo que puedan relacionarse con procesos de transporte de sedimento. Esto orientado principalmente a la validación de la hipótesis de amalgamamiento según la cual esta nueva forma generada debe disparar un proceso de inestabilidades que promuevan procesos de erosión hacia la transición rizo-duna. Para ello se decidió evaluar las alteraciones existentes a través de una variable que

representara las diferencias relativas de contribución de eventos de barrido (*sweep*) y eyección a la difusión turbulenta total de cantidad de movimiento longitudinal, es decir:

$$\Delta S_H = S_{4,H} - S_{2,H} \quad (3)$$

donde

$$S_{i,H} = \frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u} \hat{w} p(\hat{u}, \hat{w}) I_{i,pH}(\hat{u}, \hat{w}) d\hat{u} d\hat{w} \quad (4)$$

siendo  $I_{i,pH}$  la función de detección que depende del tamaño  $H$  del sector hiperbólico (Nezu y Nakagawa, 1993),  $p(u, w)$  es la función de densidad de probabilidad conjunta entre  $u$  y  $w$ , y el sombrero sobre la variable indicando adimensionalización de la misma empleando el desvío estándar correspondiente como escala de velocidad.

La Figura 7 muestra el campo de contribuciones relativas para un valor de  $H = 2$  comparando resultados al inicio y final del proceso de amalgamamiento. Resulta importante destacar la diferente estructura de los eventos organizados asociados al nuevo campo de flujo en las caras de aguas arriba del siguiente rizo. Mientras que los eventos de eyección dominan la generación de tensiones de Reynolds antes del amalgamamiento, los eventos de barrido pasan a ser los predominantes luego de éste proceso. Idéntico comportamiento puede observarse a partir de las funciones de densidad de probabilidad conjunta entre  $u$  y  $w$  en esta región según se ilustra en la Figura 8. Más aún, allí puede apreciarse cómo esta estructura predomina durante todo el proceso de formación de la nueva forma de fondo. Resulta asimismo importante verificar la predominancia de eventos de barrido (*sweeps*) en regiones con flujos verticales negativos (dirigidos hacia el lecho) de energía cinética turbulenta, en correspondencia con zonas de recirculación.

Una mayor definición de las escalas propias de estos procesos puede obtenerse a partir de promedios condicionales de la serie de velocidades según (Nezu y Nakagawa, 1993):

$$\langle q(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \tau) \rangle = \frac{\int_T q(x_1, y_1, z_1, t + \tau) \cdot I(x_0, y_0, z_0, t) dt}{\int_T I(x_0, y_0, z_0, t) dt} \quad (5)$$

donde

$$I_e(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } u(t) < 0 \text{ y } w(t) > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad I_s(t) = \begin{cases} 1 & \text{para } u(t) > 0 \text{ y } w(t) < 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (6)$$

y finalmente

$$I(t) = u(t)v(t)I_e(t) \quad I(t) = u(t)v(t)I_s(t) \quad (7)$$

La Figura 9 compara promedios condicionales de  $u$ ,  $w$  y  $uw$  durante la detección de procesos de eyección y barrido en regiones cercanas al lecho inmediatamente aguas arriba de la cresta del siguiente rizo para las configuraciones RUNI y RUNIII. Resulta aquí importante resaltar no sólo el incremento relativo de intensidades de eventos de barrido por sobre las eyecciones, sino también la mayor escala temporal del esfuerzo de corte turbulento luego del proceso de amalgamamiento generado por ambos eventos coherentes.



## CONCLUSIONES

Se investigó experimentalmente la evolución espacio-temporal de la estructura del flujo medio y de la turbulencia durante un proceso de amalgamamiento simulado en la transición rizo-duna. Se observó la paulatina generación de regiones de circulación con dimensiones crecientes, mayores aún que las típicas observadas en trenes periódicos de dunas. Esto se explica por la existencia de menores aceleraciones inducidas por efectos geométricos aguas abajo, ratificada por cálculos de campo de presiones dinámicas. En coincidencia con flujos verticales negativos de energía cinética turbulenta, en regiones de recirculación se observó predominancia de eventos coherentes de barrido (sweeps) por sobre eventos de eyección en la generación de esfuerzos de corte turbulentos.

La alteración más destacable a la estructura original del tren periódico de rizos lo constituye la predominancia de *sweeps* por sobre eyecciones en la generación de esfuerzos de corte en la cara de aguas arriba del rizo siguiente al amalgamamiento. Esto último sugiere la existencia de mecanismos localizados de erosión y transporte, necesarios para disparar y mantener el proceso de generación de nuevas formas de fondo (Bennet y Best, 1996), llevando últimamente al reemplazo de rizos por dunas.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean manifestar su agradecimiento por el apoyo recibido a través del subsidio conjunto CONICOR-British Council 17/97, y de la SECyT-UNC PID 257/98.

## REFERENCIAS

- [1] Baas, J.H. (1993) "Dimensional analysis of current ripples in recent and ancient depositional environments". PhD thesis. Departamento de Geología, Universidad de Utrecht, 199pp.
- [2] Bennet, S.J. y Best, J.L. (1996) "Mean flow and turbulence structure over fixed ripples and the ripple-dune transition". Capítulo 15 del libro *Coherent flow structures in open channels*. Ed. P.J. Ashworth, S.J. Bennett, J.L. Best y S.J. McLelland. John Wiley & Sons Ltd, pp. 281-304.
- [3] Best, J.L. (1996) "The fluid dynamics of small-scale alluvial bedforms". *Advances in fluvial Dynamics and Stratigraphy*. Ed. P.A. Carling y M.R. Dawson. John Wiley & Sons Ltd. pp.67-125.
- [4] Costello, W.R. y Southard, J.B. (1980) "Flume experiments on lower-regime bed forms in coarse sand". *J.Sed. Petrol.*, 51(3), pp. 349-864.
- [5] García, M.H.; Niño, Y. y López F. (1995) "Observations of particle entrainment into suspension by turbulent bursting". Capítulo 3 del libro *Coherent flow structures in open channels*. Ed. P.J. Ashworth, S.J. Bennett, J.L. Best y S.J. McLelland. John Wiley & Sons Ltd.
- [6] Kadota, A. y Nezu, I. (1999) "Three-dimensional structure of space-time correlation on coherent vortices generated behind dune crest". *J. Hydraul. Research*, IAHR, Vol 37, N°1, pp. 59-80.
- [7] Karahan, M.E. y Peterson, A.W. (1980) "Visualisation of separation over sand waves". *J. Hydraul. Division*, ASCE, 106(HY8), pp. 345-1352.

- [8] López, F. y Best, J.L. (1998) "Bedform amalgamation at the ripple-dune transition". Spring Meeting American Geophysical Union, Boston.
- [9] Lyn, D.A. (1993) "Turbulence Measurements in Open-Channel Flows over Artificial Bed Forms". *J. Hydr. Eng.*, 119(3), pp. 306-325.
- [10] Nelson, J.M., McLean S.R. y Wolfe, S.R. (1993) "Mean Flow and Turbulence Fields over Two-Dimensional Bed Forms". *Water Res. Res.*, Vol. 29, N°12, pp. 3935-3953.
- [11] Nezu, I., Nakagawa, H. (1993) "Turbulence in Open-Channel Flows". IAHR Monograph Series. A.A. Balkema, Rotterdam.

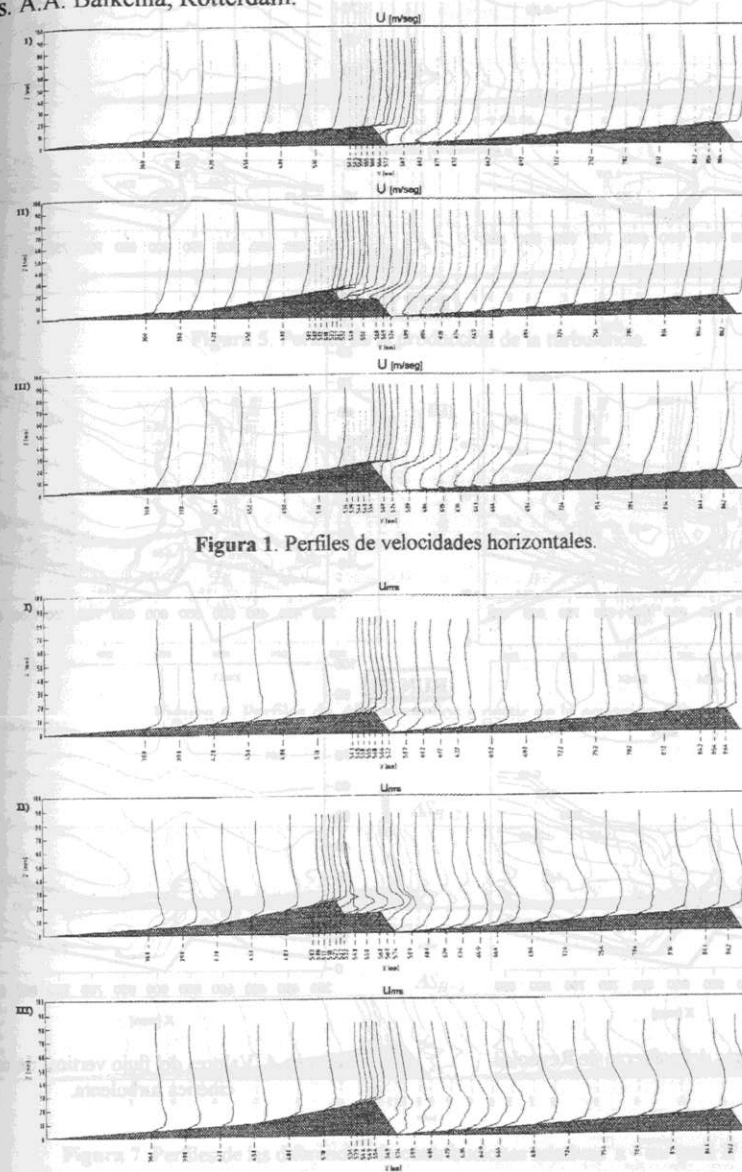


Figura 1. Perfiles de velocidades horizontales.

Figura 2. Perfiles de las intensidades horizontales de la turbulencia ( $u'^2$ ).

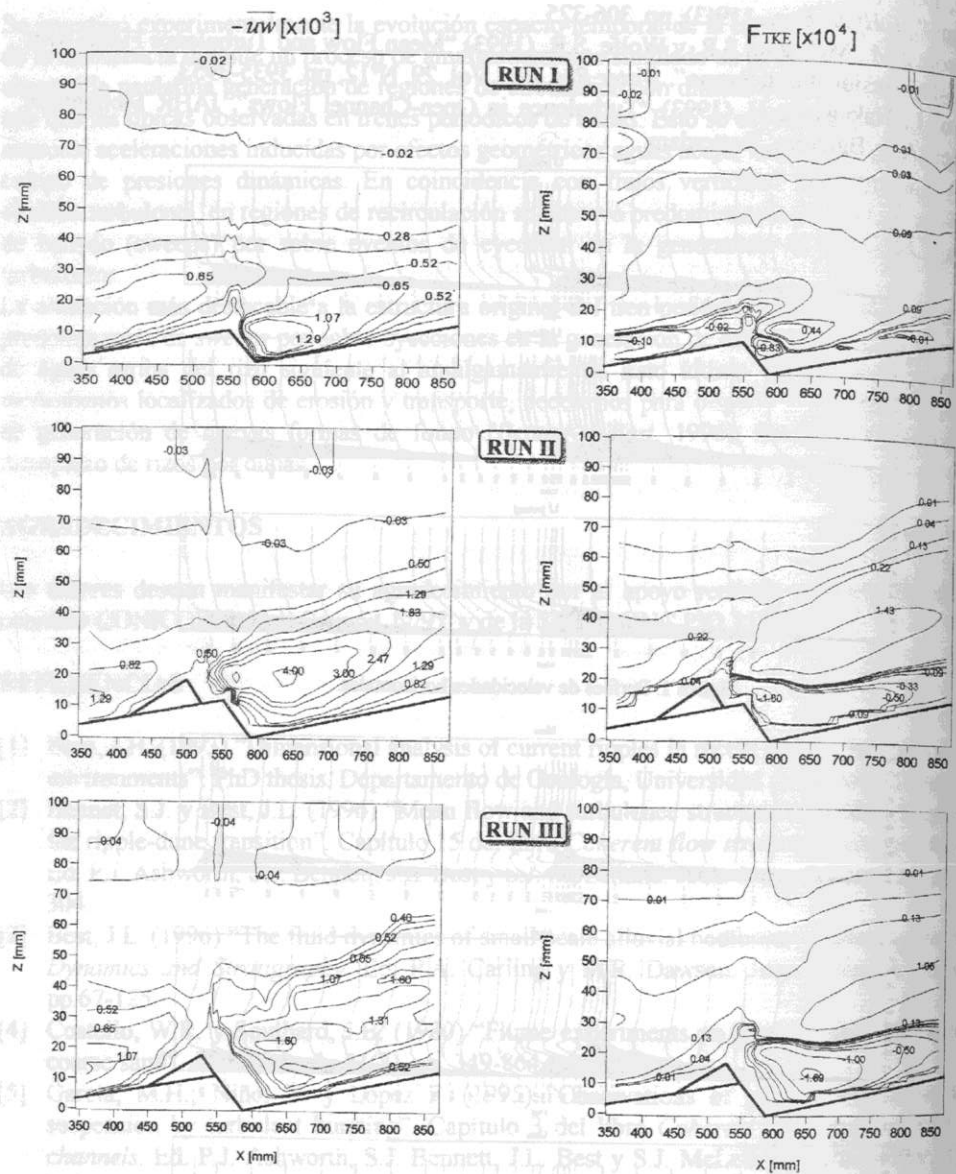


Figura 3. Valores del esfuerzo de Reynolds.

Figura 4. Valores del flujo vertical de energía cinética turbulenta.

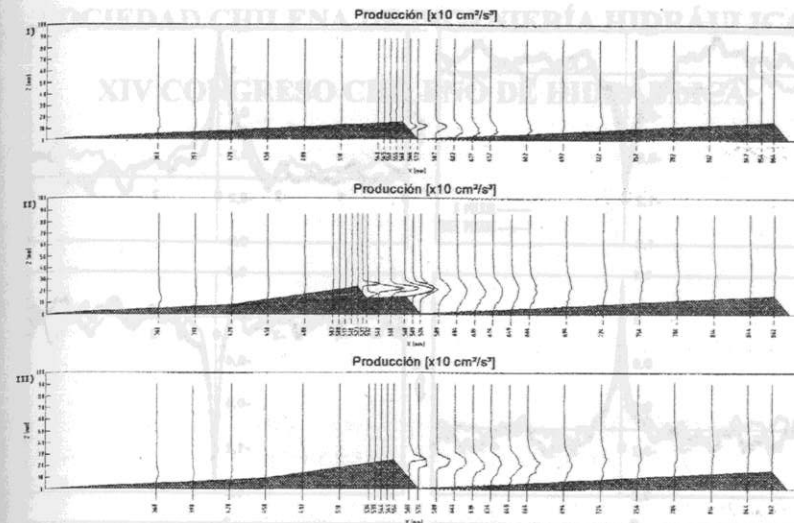


Figura 5. Perfiles de la producción de la turbulencia.

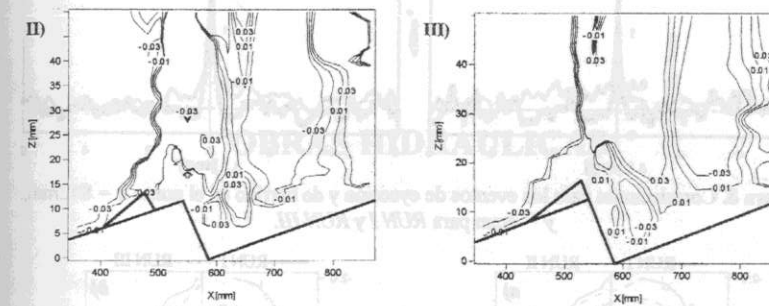


Figura 6. Perfiles de  $\Delta P$  calculados a partir de la ecuación (2).

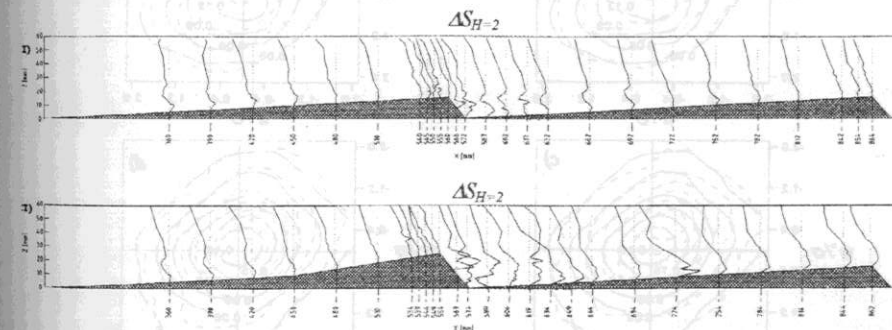


Figura 7. Perfiles de las diferencias de contribuciones relativas a  $-\overline{uw}$  para  $H = 2$ .



OBRAS HIDRÁULICAS

En las estructuras hidráulicas los causados por inundaciones, especialmente mal manejo. Por esta razón el análisis de riesgo debe ser considerado en la evaluación de las estructuras o sistemas hidráulicos. Se presenta una metodología para el análisis de riesgo que combina dos técnicas: el árbol de análisis para el estudio del sistema y el uso de la teoría de los números pequeños para el manejo de la incertidumbre. La combinación de ambas técnicas produce una metodología que puede ser utilizada como complemento para el diseño y evaluación de obras de riesgo. En la aplicación de la metodología se presenta el análisis del riesgo de contaminación de un sistema de fertirrigación después de sufrir una detención brusca de la corriente de energía. El análisis demuestra que la válvula de retención, utilizada para el arriete, tiene un papel muy importante en disminuir el riesgo de contaminar los cultivos en la fuente de suministro de agua.

Ph.D., Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción, Chile  
337 Chulfan, Chile. E-mail: jarumi@udec.cl

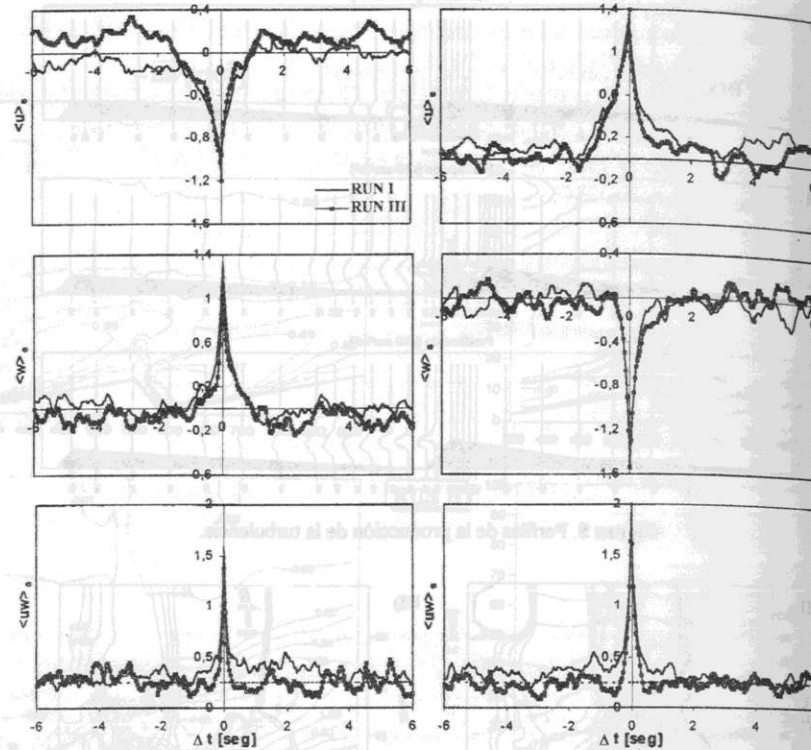


Figura 8. Correlaciones para los eventos de eyección y de barrido en el punto  $x = 842\text{mm}$ ,  $y = 4\text{mm}$  para RUN I y RUN III.

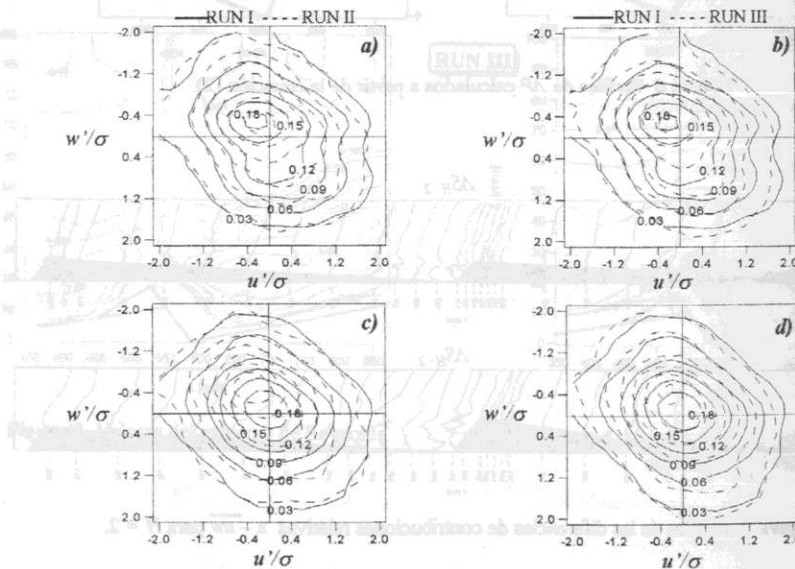


Figura 9. Función de densidad de probabilidad conjunta en la cara de aguas arriba del rizo siguiente: - a) y b) sobre la cresta del rizo, a 4mm del fondo local; c) y d) para el perfil anterior a la cresta,  $y = 4\text{mm}$ .