



UNIVERSIDAD
DE SANTIAGO DE CHILE



SOCIEDAD CHILENA DE
INGENIERÍA HIDRÁULICA

LA DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL SEDIMENTO Y EL
EL FLUJO EN LA FORMACION Y EVOLUCION DE RIZOS

MANUEL BARAIKONA'
YARKO NIÑO'

PARTE 5

HIDRÁULICA FLUVIAL Y ARRASTRE DE SEDIMENTOS

En los resultados experimentales se observó la formación y evolución de una cámara de video tipo CCD. Los resultados indican que el flujo es controlado por eventos casi-periódicos, las formas de fondo es controlada por estructuras coherentes del flujo que son capaces de hacer que las formas de fondo sean transitorios. Los resultados indican que el tamaño, la geometría y la velocidad de las formas de fondo de la interacción entre los procesos de transporte de sedimento sobre el fondo del flujo a su alrededor.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 'Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile.

5.1.- INFLUENCIA DE LA INTERACCIÓN ENTRE EL SEDIMENTO Y LA TURBULENCIA DEL FLUJO EN LA FORMACION Y EVOLUCION DE RIZOS

MANUEL BARAHONA¹
YARKO NIÑO²

RESUMEN

Se presentan y discuten los resultados de un estudio experimental acerca de la formación y evolución de rizos de arena en un canal abierto bajo la acción de un flujo turbulento. Se realizaron dos series de experiencias. En la primera de ellas se alimentó una pequeña cantidad de arena sobre el fondo del canal de modo que no se formara un lecho. Bajo estas condiciones, se generaron sobre el fondo fijo formas de fondo aisladas, similares a los barcanes, que evolucionan como estructuras auto-organizantes en forma de cardiode, y que migran en la dirección del flujo. En la segunda serie las experiencias se realizaron sobre un lecho granular móvil inicialmente plano, sobre el cual se generaron formas de fondo del tipo rizos. Para registrar la emergencia y evolución de las formas de fondo, así como también las variaciones del flujo, se utilizó una cámara de video tipo CCD. Los resultados indican que el transporte de sedimento sobre las formas de fondo es controlado por eventos cuasi-periódicos, relacionados con la existencia de estructuras coherentes del flujo que son capaces de hacer que las partículas entren en suspensión, transportándolas hacia aguas abajo, lejos de la zona de despegue al fondo de los rizos. Las observaciones indican que el tamaño final, la geometría y la celeridad de las formas de fondo, son resultado de la interacción entre los procesos de transporte de sedimento sobre las formas de fondo y las estructuras coherentes del flujo a su alrededor.

¹ Profesor Asistente. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.
² Profesor Asistente. División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Chile.

1.- INTRODUCCIÓN

El flujo de agua sobre un lecho móvil de material no cohesivo provoca que el lecho se deforme creando un patrón de ondulaciones espacialmente periódicas conocidas como ondas sedimentarias o formas de fondo. Formas de fondo tales como rizos y dunas emergen y se desarrollan como consecuencia de la interacción entre la deformación del lecho, la capa límite turbulenta, y los procesos de transporte de sedimento que tienen lugar cerca del lecho. En la actualidad esta interacción se comprende sólo parcialmente (Bennett y Best, 1996).

Las formas de fondo completamente desarrolladas y el patrón de flujo alrededor de ellas representan un tipo de estructura coherente del sistema flujo-sedimento. Mas aún, sobre estas estructuras existe un campo de flujo turbulento que también exhibe cierta coherencia con la presencia de eventos cuasi-periódicos, tales como eyecciones y barridos, y diferentes tipos de vórtices que ocurren cerca de la pared. La evidencia experimental muestra que estas estructuras coherentes controlan los procesos de transporte de sedimento que tienen lugar cerca de la pared (Niño y García, 1996), y por lo tanto, existe una importante interacción entre estas estructuras y las formas de fondo. Las estructuras coherentes que se presentan con mayor frecuencia en la región cercana a la pared sobre un lecho fijo, corresponden a vórtices longitudinales relacionados con las llamadas estrias de alta y baja velocidad, superficies de corte y vórtices de embudo relacionados con eventos de eyección desde zonas de baja velocidad cerca del lecho hacia zonas alejadas de la pared, vórtices transversales relacionados con estructuras del tipo horquilla, y eventos de barrido relacionados con el movimiento de fluido desde zonas de alta velocidad hacia el lecho (García et al., 1996). El flujo alrededor de las formas de fondo también presenta estructuras coherentes, cuya más clara expresión es un vórtice transversal generado en la zona de despegue del flujo aguas abajo de las formas de fondo. En la cresta de las formas de fondo se desarrolla una capa de mezcla, causada por la interacción entre el flujo externo que pasa sobre la estructura y la circulación del flujo dentro de esta estela.

En este trabajo se presentan y discuten los resultados de observaciones experimentales realizadas para estudiar la influencia de la interacción entre el sedimento y la turbulencia del flujo, en la formación y evolución de rizos en un canal abierto. Se estudiaron dos tipos de formas de fondo: estructuras de fondo aisladas similares a barcanes, que emergen sobre el lecho fijo de un canal en condiciones de déficit de alimentación de sedimento, y rizos bidimensionales que emergen sobre un lecho móvil.

2.- ESTUDIO EXPERIMENTAL

Las experiencias se llevaron a cabo en un canal rectangular de 0,3 m de ancho, 0,3 m de alto y 10,0 m de largo, con una pendiente de 0,001. El agua es descargada a una sentina subterránea desde donde es recirculada hacia el canal utilizando una bomba de impulsión. El sedimento transportado en el canal es recirculado por un circuito independiente. Una trampa de sedimentos ubicada en el extremo de aguas abajo del canal se conecta a una bomba que conduce una mezcla de agua y sedimento hacia el comienzo de éste, donde es descargada uniformemente a lo ancho con la ayuda de un distribuidor. Para registrar las experiencias se utilizó una cámara CCD conectada a un video-grabador. Lentes de 80 y 125 mm y tubos de extensión de distintas longitudes permitieron dar la magnificación adecuada a las imágenes. Un foco halógeno de 1000 watt permitió obtener una iluminación en un plano vertical o en un plano longitudinal, según fue requerido. El análisis cuantitativo de las imágenes de video se realizó digitalizando las imágenes seleccionadas en un computador personal.

Se realizaron dos series de experiencias (Serie I y II). En la primera de ellas se utilizó una cierta cantidad de arena distribuida uniformemente sobre el fondo fijo del canal, de tal modo que las partículas pudieran ser transportadas individualmente sin formar un lecho. En la segunda serie en cambio, se utilizó una cantidad de arena mayor que permitió formar un lecho granular móvil de espesor aproximadamente 5 cm de espesor. En las experiencias de la Serie I se usaron cuatro tamaños diferentes de partículas, $d_s = 0,20, 0,30, 0,46$ y $0,55$ mm, y dos volúmenes diferentes de sedimento, $V_s = 0,1$ y $0,2$ litros aproximadamente. En las experiencias de la Serie II se utilizó arena de tamaño uniforme con un diámetro medio $d_s = 0,55$ mm.

Con la cámara CCD ubicada sobre el canal se registró la evolución de las partículas distribuidas uniformemente a lo largo del canal (Serie I), y del lecho inicialmente plano (Serie II), hasta llegar al desarrollo de formas de fondo, cuyas características geométricas y cinemáticas fueron también registradas con esta cámara. Además, una visualización lateral de las formas de fondo permitió hacer una descripción del perfil longitudinal de ellas. En las experiencias de la Serie II, se utilizó una metodología adicional para registrar la evolución temporal del perfil longitudinal de las formas de fondo. Esta última consistió en proyectar la sombra de una placa horizontal sobre el lecho, grabándola desde arriba. La elevación del lecho se obtuvo luego de un análisis geométrico de la variación del tamaño de la sombra proyectada sobre el lecho del canal.

Adicionalmente, se realizaron experiencias de visualización del flujo en las cercanías del lecho. En ellas se inyectó leche a través de un tubo muy delgado cerca del lecho, a una cierta distancia aguas arriba de una forma de fondo, la que actuaba como trazador de las estructuras coherentes del lecho desarrolladas cerca de la superficie de ellas. La descarga de leche se controló de tal forma de no perturbar el flujo ni las formas de fondo, y permitir que el trazador marcara las eyecciones del flujo desde el lecho. Las visualizaciones del flujo y las eyecciones de partículas desde el lecho fueron grabadas utilizando la cámara CCD con una velocidad de obturación de 500 Hz y con una iluminación en un plano vertical desde arriba.

Los experimentos se llevaron a cabo bajo condiciones de flujo uniforme y con transporte generalizado de fondo. El número de Reynolds ($Re = UH/\nu$, donde U denota la velocidad media del flujo, H la altura de escurrimiento del flujo y ν la viscosidad cinemática) varió entre 9000 y 10000 aproximadamente, con alturas de escurrimiento entre 4 y 19 cm. Los valores de la velocidad de corte, u_* , obtenidos de un ajuste por mínimos cuadrados de las distribuciones de velocidad medidas en el canal a un perfil logarítmico teórico para canales abiertos, varió en un rango de 0,016 a 0,022 m/s. Estos valores de u_* corresponden a condiciones de lecho plano. En el caso de la Serie I, el perfil de velocidades se midió sobre el lecho fijo del canal. En el caso de la Serie II en cambio, éste se midió sobre una plancha de acrílico instalada sobre el fondo del canal, que previamente fue cubierta completamente con partículas de arena del mismo tamaño que la utilizada en el lecho granular móvil.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Experiencias de la Serie I

Bajo condiciones de lecho fijo con déficit de sedimento, las partículas de arena cuyo tamaño supera en gran medida el espesor de la subcapa viscosa tienden a ordenarse a lo largo de estrias de fondo como las descritas por Niño y García (1996). Al incrementarse la cantidad de partículas a lo

largo de estas estrias, la interacción entre las partículas de estrias vecinas aumenta, produciéndose la formación de acumulaciones aleatorias de arena a lo largo del canal. Estas aglomeraciones de partículas aumentan su tamaño hasta alcanzar una forma coherente, evolucionando como una estructura auto-organizante que migra en la dirección del flujo. Estas estructuras son similares a los barcanes generados por un flujo de viento sobre la arena (Bagnold, 1941). En este trabajo estas estructuras fueron bautizadas como "rizos barcánicos". En el caso de las partículas cuyo tamaño es superior al del espesor de la subcapa viscosa, no se producen aglomeraciones de partículas, y por lo tanto no generan estructuras de fondo. En este caso, sin embargo, el aumento de la cantidad de sedimento sobre el lecho permitió aumentar la interacción entre partículas y por lo tanto se crearon las condiciones adecuadas para que la formación de rizos barcánicos fuera posible.

En la Fig. 1 se muestra una vista en planta y un perfil longitudinal de un rizo barcánico típico. El tamaño de las estructuras depende de la cantidad de sedimento acumulado en la aglomeración inicial a partir de la cual se genera la forma de fondo, sin embargo, su forma es aproximadamente similar. Los valores medios de las razones a/h y l/h , donde a denota el ancho, l el largo y h la altura de los rizos barcánicos, son de magnitudes similares y su valor tiende a hacerse constante cuando el valor del número de Reynolds de la partícula ($Re_{d_s} = u_* d_s / \nu$) es mayor que aproximadamente 5. El valor de la altura adimensional de los rizos barcánicos, h/d_s , es independiente de Re_{d_s} y se mantiene en un rango de 10 a 20. La celeridad de las formas de fondo observadas, c , está en un rango de 2% a 17% de u_* y la razón c/u_* aumenta cuando Re_{d_s} aumenta. Por otro lado, c aumenta cuando h decrece, tal como lo describieron Coleman y Melville (1994) para rizos sobre un lecho móvil. Esto significa que las formas de fondo más pequeñas se mueven más rápido que las más grandes, lo cual causa la interacción entre dos formas de fondo de distinto tamaño cuando un rizo barcánico pequeño se junta con otro más grande.

En las experiencias con un mayor volumen de sedimento se genera una cantidad mayor de rizos barcánicos. En estos casos las formas de fondo interactúan entre sí creando un tren de formas de fondo con una longitud de onda característica. La interacción entre estas estructuras se manifiesta a través de la tasa de alimentación de sedimento hacia alguna forma de fondo en particular, la cual es controlada por la tasa de salida de la forma de fondo ubicada inmediatamente aguas arriba de ella. La cantidad de sedimento que abandona el rizo barcánico es mayor en las ramas de él, que en la cresta. Esto provoca que el tren de formas de fondo sea inestable, y que los rizos barcánicos se alternen de manera tal que el centro de una estructura coincide con la rama de la estructura de aguas arriba.

Los rizos barcánicos son estructuras auto-organizantes. Cuando están completamente desarrolladas ellas mantienen su forma y tamaño. Hay una entrada constante de sedimento a la estructura, con una tasa de alimentación dada por las condiciones de transporte de sedimento de aguas arriba, y también una salida de partículas desde ella, con una tasa de salida dada por el transporte de sedimento en la superficie del rizo barcánico. La cantidad de partículas que abandonan la estructura es mayor en las ramas de esta que en la superficie. Esto debido a que gran parte de las partículas de arena que abandonan la estructura desde la parte más de ella quedan atrapadas en la zona de despegue generada al pie de la forma de fondo. No obstante, la interacción entre los granos individuales y las estructuras coherentes del flujo provocan que las partículas de arena entren en suspensión, son arrastradas hacia aguas abajo, lejos de la zona de separación. Las estructuras coherentes del flujo observadas corresponden a superficies de corte como las descritas por Niño y García (1996).

de embudo similares a los descritos por Kaftori (1995) tal como los mostrados en la Fig. 2. Los tipos de estructuras coherentes del flujo no experimentan cambios significativos al pasar de las formas de fondo. También se observaron eventos de barrido del flujo dirigidos hacia el lecho, los cuales originan la entrada en suspensión de partículas (Fig. 3). Los rizos barcánicos logran un equilibrio cuando se han balanceado las tasas de entrada y salida de sedimento de la estructura. Las observaciones indican que el tamaño final de los rizos barcánicos es resultado de la interacción de los procesos de transporte de sedimento que tienen lugar sobre las formas de fondo y las estructuras coherentes del flujo alrededor de ellas.

Experiencias de la Serie II

Las observaciones realizadas indican que sobre un lecho granular móvil inicialmente plano se forman estrias de pared similares a las observadas para el caso de un lecho fijo con déficit de sedimento. Después de un tiempo, el lecho inicialmente plano presenta un cierto reordenamiento de partículas, el que sin embargo, no va acompañado de la presencia de estructuras de fondo coherentes. Acto seguido se observa un período de rápida transición, en el cual emergen sucesivamente a lo largo del canal patrones de formas de fondo con una longitud de onda característica. Estos patrones de ordenamiento corresponden a grupos de ondas sedimentarias bidimensionales (5 a 10 cm) de pequeña amplitud que emergen en el centro de la sección transversal del canal y que se propagan lateralmente hasta cubrir prácticamente todo el ancho del canal (Fig. 4).

Coleman y Melville (1996) utilizan el término "sand-wavelets" para nombrar a las formas de fondo en el período inicial de su formación. En las experiencias llevadas a cabo en el presente trabajo, las formas de fondo evolucionan en el tiempo aumentando su amplitud y longitud de onda, avanzando aguas abajo con una celeridad levemente decreciente. La migración y el aumento de la longitud de onda generan una interacción entre los distintos grupos de formas de fondo. Por otro lado, la inestabilidad secundaria aparece y se propaga dentro de los grupos de formas de fondo, lo que causa la pérdida del ordenamiento bidimensional de ellas, generándose así estructuras de fondo unidimensionales similares a las observadas en las experiencias de la Serie I (Fig. 4).

Las características del proceso de formación de las ondas sedimentarias generadas en las presentes experiencias, contradicen las teorías que indican que las formas de fondo se generan a partir de una perturbación local del lecho que se propaga hacia aguas abajo (por ejemplo, Williams y Kemp, 1971). En cambio, estas observaciones están más de acuerdo con las teorías que indican que las formas de fondo se generan producto de una inestabilidad del sistema flujo sedimento (Engelund y Fredsoe, 1973; Niño, 1996). Desde este punto de vista, las estructuras turbulentas del flujo no tienen una influencia directa en el proceso de formación de las ondas sedimentarias. No obstante, es posible que las perturbaciones locales del lecho, por ejemplo aquellas asociadas con el reordenamiento inicial del lecho y probablemente causado por la interacción entre las estructuras coherentes del flujo y los procesos de transporte de sedimento, podrían fijar las perturbaciones del flujo con una longitud de onda que corresponde a la de los modos de oscilación inestable del sistema flujo sedimento, a través del proceso descrito en la llamada teoría de receptividad (Kerchen, 1989). Esto explicaría el surgimiento de la formación del lecho con un espaciamiento periódico, tal como el observado en estas experiencias.

El crecimiento de la amplitud de las formas de fondo aquí observadas fue gradual (Fig. 5), sin presentar el fenómeno de coalescencia de formas de fondo propuesto en la teoría de unificación de Williams y Wille, (1990). Esta teoría postula que el crecimiento de las ondas sedimentarias tiene su origen en la coalescencia de las formas de fondo producto de las distintas celeridades a las que éstas se mueven. Si bien es cierto los resultados de las presentes experiencias indican que a medida que las

formas de fondo aumentan su altura decrece su velocidad de migración, esta variación es demasiado pequeña y la celeridad de estas estructuras se mantiene prácticamente constante. Más aún, la longitud de onda de las formas de fondo crece en el tiempo (Fig. 6) lo cual impediría la interacción entre ellas. Debido a que tanto la amplitud como la longitud de onda de las formas de fondo crecen en el tiempo, la razón entre ellas se mantiene constante en el tiempo en torno a un valor de aproximadamente 11.

Las sand-wavelets evolucionan en el tiempo hasta alcanzar una forma más asimétrica caracterizada por una pendiente brusca en la cara de aguas abajo, dada por el ángulo de reposo de los granos de arena. El sedimento es transportado sobre la superficie de la forma de fondo, principalmente por un mecanismo de saltación de partículas, acercándose a la cresta de la estructura, principalmente quedan atrapadas en la zona de despegue del flujo aguas abajo de ella. Las observaciones de campo y las presentes experiencias indican que hay dos mecanismos diferentes que generan el alejamiento de las partículas desde las formas de fondo. Uno de ellos tiene que ver con la ocurrencia de eventos cuasi-periódicos de estallidos de partículas, relacionados con fenómenos de eyecciones y barridos de partículas que provocan que las partículas entren en suspensión desde la superficie de la estructura. Estas partículas son transportadas en suspensión hacia aguas abajo, alejándose de la zona de despegue del flujo. El segundo mecanismo está relacionado con las partículas que son suspendidas producto de la gran turbulencia generada en la zona de reapeque del flujo al término de la zona de despegue.

Las visualizaciones del flujo muestran la presencia de estructuras coherentes tales como superficies de corte y vórtices de embudo (Fig. 7), las que al igual que en el caso de los rizos barcánicos (Serie I) no experimentan mayores cambios en su forma al pasar sobre las formas de fondo. Estas estructuras, así como también los fenómenos de eyección y barrido del flujo, interactúan con las partículas de arena provocando que estas últimas entren en suspensión. Además, se observó el desarrollo de una capa de mezcla en la cresta de la forma de fondo (Fig. 7), generada por la interacción entre el paso del flujo sobre ella y la circulación del flujo en el interior de la estela, tal como lo describiera Müller y Gyr (1986). De acuerdo con esto, la inestabilidad dentro de la capa de mezcla genera la aparición de vórtices de horquilla, que serían los responsables de la erosión del lecho a los pies de la estructura. Las presentes observaciones indican que esta erosión genera una retroalimentación de sedimento a la estructura, lo que permite que esta mantenga su forma. Por otro lado, el proceso de entrada en suspensión de partículas en la zona de reapeque del flujo es provocada por la acción del vórtice de eje transversal en la zona de separación del flujo.

Estos resultados indican que las sand-wavelets son estructuras auto-organizantes, cuya geometría y celeridad está controlada por la interacción entre las estructuras coherentes del flujo, los procesos de transporte de sedimentos y la deformación del lecho.

4.- CONCLUSIONES

Los rizos barcánicos se desarrollan a partir de la acumulación de partículas de arena sobre un lecho fijo. Ellos evolucionan y avanzan hacia aguas abajo como estructuras auto-organizantes y muy similares con una forma de cardiode. Las sand-wavelets emergen sobre un lecho granular móvil como una perturbación bidimensional y espacialmente periódica del lecho, la que es resultado de la inestabilidad en el sistema flujo-sedimento. Ellas evolucionan como estructuras auto-organizantes que incrementan su amplitud y longitud de onda, y que migran en dirección de aguas abajo. En algunos casos el transporte de sedimento es controlado por eventos cuasi-periódicos, relacionados con la existencia de estructuras coherentes del flujo, que son capaces de hacer que el sedimento entre en suspensión, transportando los granos hacia aguas abajo, lejos de la zona de despegue generada a los pies de ella. En el caso de los rizos, el vórtice de eje transversal generado en la zona de despegue

provoca una erosión del lecho que contribuye a la amplitud del rizo y que colabora en el proceso de transporte de sedimentos. La geometría y celeridad de las formas de fondo son controladas por una compleja interacción entre la deformación del lecho, los procesos de transporte de sedimento sobre las estructuras coherentes del flujo a su alrededor.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT, a través del Proyecto N° 1980592, y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

- BAGNOLD, R.A. (1941). "The physics of blown sand desert dunes". Chapman & Hall, London.
- BENNETT, S.J. Y BEST, J.L. (1996). "Mean flow and turbulence structure over fixed-ripples and the ripple dune transition". Coherent flow structures in open channels. Ashworth, Bennett, Best y McLelland, Eds. John Wiley y Sons.
- COLEMAN, S.E. Y MELVILLE, B. W. (1994). "Bed form development". J. Hydr. Engrg., Vol. 120, N° 4, pp. 544-560.
- COLEMAN, S.E. Y MELVILLE, B. W. (1996). "Initiation of bed forms on a flat sand bed". J. Hydr. Engrg., Vol. 122, N° 6, pp. 301-310.
- ENGELUND, F Y FREDSOE, J. (1982). "Sediment ripples and dunes". Ann. Rev. Fluid Mech. Vol. 14, pp 13-37.
- FREDSOE, J. (1974). "On development of dunes in erodible channels". J. Fluid Mech., Vol. 64, part 1, pp. 1-16.
- GARCÍA, M., NIÑO, Y., LÓPEZ, F. (1996). "Laboratory observations of particle entrainment into suspension by turbulent bursting". In Coherent flow structures in open channels, pp. 63-86. Ashworth, Bennett, Best, and McLelland, Eds. John Wiley & Sons.
- KAFTORI, D., HETSRONI, G., Y BANERJEE, S. (1994). "Funnel-shaped vortical structures in wall turbulence". Phys. Fluids 6, pp. 3035-3050.
- KERSCHEN, E. (1989). "Boundary layer receptivity". AIAA 12 th Aeroacoustics conference, San Antonio, Texas AIAA-89-1109.
- MÜLLER, A. Y GYR, A. (1986). "On the vortex formation in the mixing layer behind dunes". J. Hydr. Research, Vol. 24, N° 5, pp. 359-375.
- NIÑO, Y. (1996). "Inestabilidades en un lecho granular móvil: análisis matemático de formas de fondo". Ingenier'a del Agua, Vol. 3, N° 4, pp. 25-36.
- NIÑO, Y. Y GARCÍA, M. (1996). "Experiments on particle-turbulence interactions in the near region of an open channel flow: implications for sediment transport". J. Fluid Mech., 326, pp. 285-319.
- RAUDKIVI, A.J. Y WITTE, H. (1990). "Development of beds features". J. Hydr. Engrg., Vol. 116, N° 9, pp. 1063-1079.
- WILLIAMS, P. Y KEMP, P. (1971). "Initiation of ripples on flat sediment beds". J. Hydr. Div., vol. 97, N° HY4, pp. 505-522.
- VALIN, M.S. (1992). "River mechanics". Pergamon Press.

Fig. 1 Vista en planta de un rizo barcánico típico. El flujo es de izquierda a derecha. El campo de visión es aproximadamente de 12 cm. por 9 cm.



Fig 2 Vórtice de embudo desarrollándose sobre un rizo barcánico. El campo de visión es aproximadamente de 1.3 cm. por 1.6 cm. El intervalo de tiempo entre imágenes es 0.033 s.

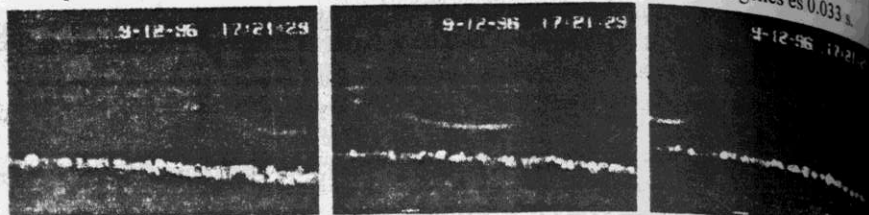


Fig. 3 Evento de Barrido generando suspensión de sedimento. El campo de visión es aproximadamente de 1.3 cm. por 1.6 cm. El intervalo de tiempo entre imágenes es 0.033 s.

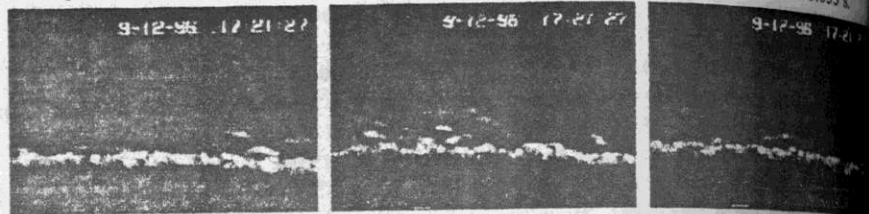


Fig. 4 Evolución temporal del lecho. El campo de visión es de 25 cm. por 50 cm. Las imágenes corresponden a los siguientes tiempos medidos después de establecidas las condiciones de flujo uniforme: 1.8, 2.3, 3.0, 5.0, y 19.0 min. Las "sand-wavelets" emergen simultáneamente en todo el lecho con una longitud característica. Frente bidimensionales se forman en el centro del canal y luego se expanden lateralmente a todo el ancho. Más tarde en el lecho se generan patrones tridimensionales semejantes a rizos barcánicos.



Fig. 5 Evolución temporal de la amplitud de las "sand-wavelets". Distintos símbolos representan distintos valores del parámetro $Re_s = u_s h / \nu$ en el rango 1473 a 4813.

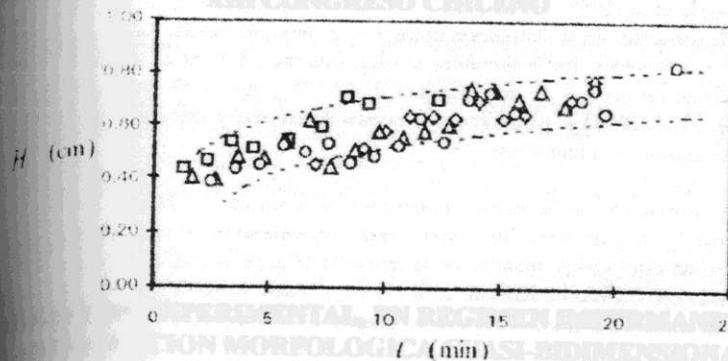


Fig. 6 Evolución temporal de la longitud de onda de las "sand-wavelets". Distintos símbolos representan distintos valores del parámetro $Re_s = u_s h / \nu$ en el rango 1473 a 4813.

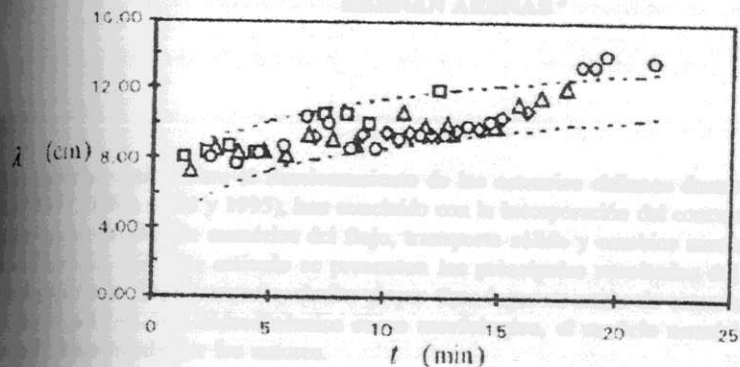


Fig 7 Capas de corte pasando sobre un rizo. En la última imagen se puede observar la interacción de una capa de corte con la capa de mezcla que se desarrolla en la cresta de la forma de fondo. El campo de visión es de 3.5 cm. por 2.0 cm. El flujo de derecha a izquierda.

