

Transporte de sedimentos por Jets

Vanina Rubio⁽¹⁾, Paula Matsuyama⁽¹⁾, Marcelo Piva⁽²⁾, Roman Martino⁽²⁾, Agnes Paterson⁽¹⁾

(1) Departamento de Hidráulica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

(2) Grupo de Medios Porosos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.

E-mail: mpiva@fi.uba.ar

RESUMEN

En este trabajo se presenta un estudio experimental sobre la dinámica de sedimentos movilizados por un sistema de jets que se lleva a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UBA. El sistema experimental consiste en un arreglo lineal de 27 jets de 1mm de diámetro que impactan sobre un lecho granular con ángulo de ataque variable. La capa de sedimentos es arena tamizada con un diámetro medio de 450 micrones y está sumergida en un canal de 20cm de tirante. El arreglo de jets es alimentado por una bomba centrífuga que permite velocidades máximas de aproximadamente 1,5m/s en la boca de jet. El arreglo se desplaza longitudinalmente al canal con velocidad controlada. Se estudia el desplazamiento de la capa de sedimentos en función del caudal, ángulo de inclinación y velocidad de avance de los jets. El estudio utiliza técnicas complementarias, por un lado se determina la masa de sólidos transportada por pesada simple y por el otro se determina la variación en el espesor de la capa de sedimentos mediante un sistema óptico de cámara CCD y tratamiento de imágenes.

INTRODUCCIÓN

Dentro de los fenómenos estudiados asociados al transporte de sedimentos, dos aspectos que se han desarrollado fuertemente son las ecuaciones de transporte en ríos y las erosiones locales inducidas. Las erosiones locales presentan una alta complejidad debido a la estructura de las corrientes. Jets sumergidos, ya sean normales o tangenciales a las superficies de un lecho granular, desplazan la arena generando un foso y dunas laterales. La geometría del foso es una consecuencia de la fuerza ejercida por los jets, parte de la cual se utiliza para desplazar al sedimento que conforma la duna. Varios estudios muestran que el volumen erosionado aumenta con el logaritmo del tiempo. En la Figura 1 se muestra un esquema del jet impactando sobre el fondo de sedimento, el consecuente pozo de erosión y las dunas laterales consecuencia de la sedimentación de los granos.

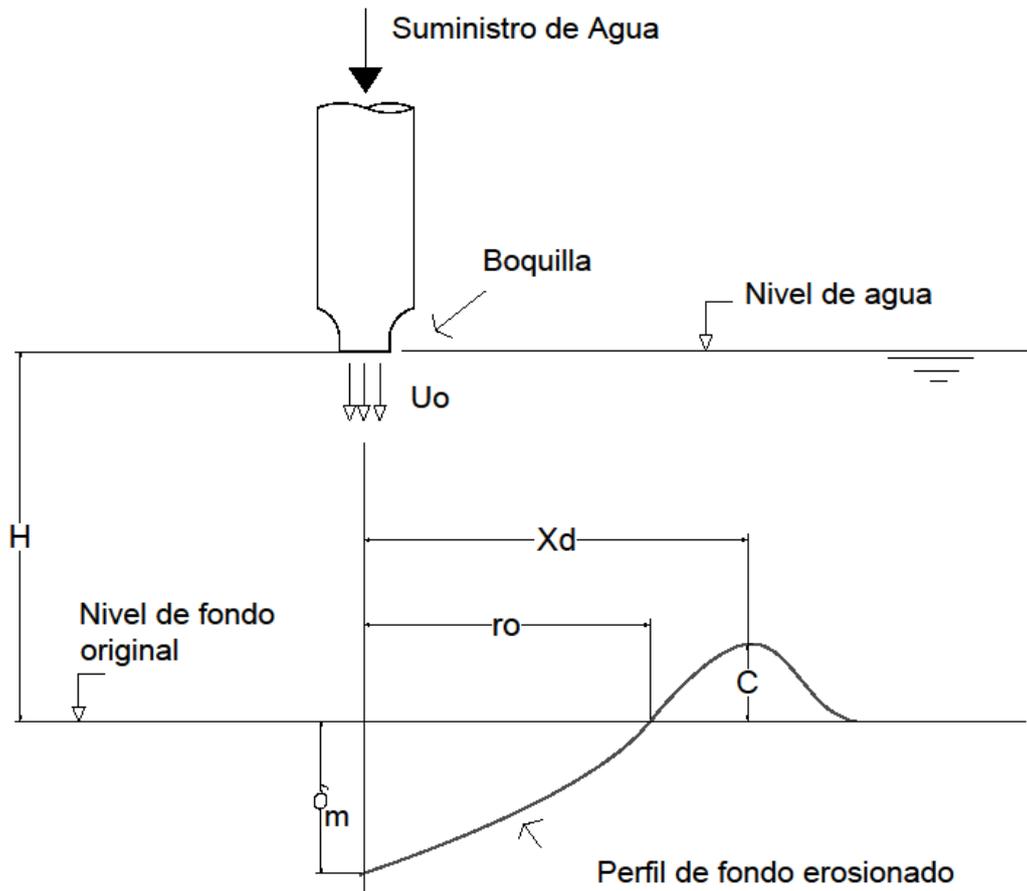


Figura 1-Esquema del impacto de un jet sobre un lecho granular.

Podemos citar como ejemplos de erosión localizada, la erosión en pilas de puentes. Una condición de borde fija, como lo es una pila de un puente, genera una aceleración de la corriente de agua localmente que a partir de ese punto se propaga como un jet. Otro ejemplo está asociado al problema de predicción y prevención de la erosión localizada en canales debido a las hélices de los buques. Para mejorar la autonomía respecto de los servicios de remolcadores y proporcionar una mejor maniobrabilidad en canales estrechos, las hélices son cada vez más grandes, producen un perfil de fuerza concentrada y poderosa que incide en la orilla. Se evidencian fenómenos de erosión localizada que finalmente conducen a la erosión e inestabilidad de los márgenes. Como consecuencia, los sedimentos removidos son transportados al interior de canal reduciendo notablemente su profundidad navegable y los puertos se ven obligados a dragar o reponer arena en determinadas zonas.

En vías navegables, las operaciones de dragado se realizan para aumentar la profundidad náutica y así garantizar las condiciones de tráfico y evitar riesgos de encallamiento. En la actualidad, está prohibido el vertimiento de suelos contaminados, extraídos por dragado, en zonas de relleno ribereñas. Ante esta restricción, una solución posible es el de dragas hidráulicas, que ponen en suspensión la capa superficial del lecho del canal. Bajo el efecto de una corriente de gravedad el sedimento suspendido se mueve de manera

autónoma hacia las zonas más profundas. Por lo tanto para que las dragas hidráulicas cumplan su función, es necesario que el lecho tenga una pendiente suficiente para permitir el arrastre del suelo. Un ejemplo de esta aplicación, es la utilización de la draga JETSED (Van Oord), en el dragado de mantenimiento del Puerto de Bahía blanca (Figura 2).



Figura 2 – Draga JETSED

Este tipo de Dragas de inyección de agua se utiliza a menudo en los puertos pequeños, ya que tienen una buena maniobrabilidad y pueden dragar muy cerca de terraplenes y muros de muelle. Un haz de jets, inyecta grandes cantidades de agua a baja presión en el limo o arena fina con el fin de poner en suspensión la misma. La mezcla de sedimentos se convierte en una corriente densa, que luego se va desplazando con la ayuda de la gravedad.

En el caso de canales donde la pendiente no es suficiente, es necesario establecer un procedimiento alternativo para remediar ese problema. La solución propuesta es el desplazamiento del sedimento de la zona de muelle hacia el centro del canal mediante jets con un movimiento de barrido transversal al eje del canal. Esta técnica novedosa necesita de poder predecir las condiciones óptimas de barrido.

ANTECEDENTES

Existen estudios realizados en jets fijos con diferentes ángulos de impacto [1,2] y sistemas de jets móviles avanzando en dirección opuesta al sentido de flujo de los jets [3]. En muchos de estos trabajos se busca no sólo caracterizar la socavación producida por estos flujos locales acelerados pero también obtener una ecuación de transporte de sedimento [4, 5]. La geometría de la boquilla del jet en los estudios fijos es rectangular del ancho de la celda que los contiene.

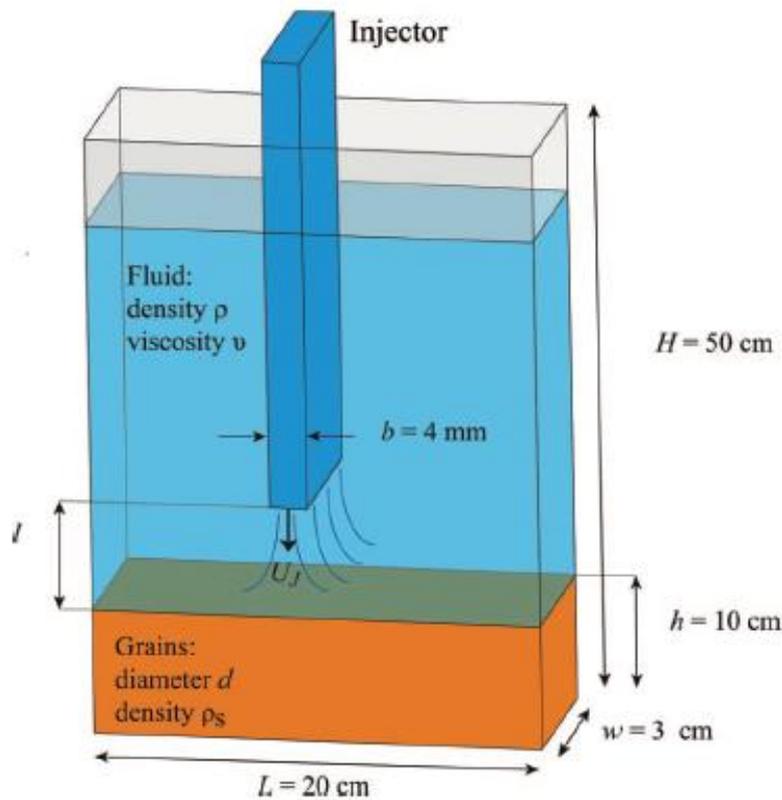


Figura 3 – Esquema del sistema experimental de Gondret et al.

En la Figura 3 se muestra un esquema del sistema experimental donde el jet vertical impacta sobre la capa de sedimento. El caudal Q se varía utilizando una bomba, logrando una velocidad U_j de entre 0 y 1 m/s.

Teniendo en cuenta la numerosa cantidad de parámetros involucrados en las experiencias, muchos parámetros adimensionales podrían ser considerados. En el trabajo de Gondret et al. [6] se utilizan los siguientes:

$$(1) \quad Re_J = \frac{U_J b}{\nu}, \quad Sh_J = \frac{\rho U_J^2}{(\rho_s - \rho) g d}, \quad l^* = \frac{l}{b},$$

Donde Re_J es el número de Reynolds que caracteriza la relación entre las fuerzas viscosas e inerciales del jet, Sh_J es el número de Shields que caracteriza la relación entre la fuerza del fluido del jet sobre un grano y su peso aparente y l^* es la distancia entre la descarga del jet y el lecho normalizado por el ancho del jet.

N. Rajaratnam estudió el caso de la erosión como resultado de la acción de un sistema plano turbulento de jets, realizando tres (3) series: erosión de lecho de arena con chorros de aire, erosión de lecho de partículas de poliestireno con chorros de aire y erosión de lecho de arena con jets de agua.

Los resultados de Rajaratnam [7] para un jet fijo vertical sobre un lecho de arena de diámetros entre 1,2 y 2,38 mm muestran que el perfil erosionado resulta asintótico con el tiempo, y que las longitudes características de la erosión son función del número de Froude densimétrico, F_0 :

$$(2) \quad F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{g \times \frac{\Delta\rho}{\rho} \times D}}$$

Donde U_0 es la velocidad de salida del jet, g es la aceleración gravitatoria, ρ es la masa específica del agua, $\Delta\rho$ es la diferencia de las masas específicas del sedimento y el agua, y D es el diámetro de la partícula.

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo experimental consiste en un sistema lineal equidistante de veintisiete (27) jets de 1 mm de diámetro interno ($2b_0 = 1\text{mm}$) que impactan desde una distancia $H = 2.5\text{ cm}$ sobre un lecho granular con un ángulo variable. En este trabajo se presentan resultados obtenidos con un ángulo de 45° (ver Figura 4).



Figura 4– Sistema de Jets

Todo el sistema de jets está soportado por dos barras laterales conectadas a un carro móvil, el cual puede desplazarse sobre rieles colocados en las caras superiores de las paredes del canal.

Para el sistema de alimentación se utiliza un tubo de plástico micro perforado con 27 hoyos, de 20 cm de longitud y 4 cm de diámetro que se conecta a una bomba centrífuga y a un caudalímetro para medir caudales inferiores a 6 l/min con una certeza de $\pm 0,2\text{ l/min}$. El caudal de la bomba que alimenta los jets podrá variar entre 0 y 4 litros/min. Dentro de este rango de caudales se podrán alcanzar velocidades de chorro de hasta 3m/s. La red de jets se conecta al sistema de alimentación por medio de tubos delgados de plástico provistos de válvulas reguladoras, con el fin de garantizar que todos los jets tengan el mismo flujo.

El canal del departamento de hidráulica posee un fondo plano horizontal con una longitud total de 4 m, ancho 15 cm y alto 25 cm, pero para la experiencia se ha utilizado solo la parte central del mismo. En el

extremo derecho del canal, se ha colocado una compuerta cerrada que fija el tirante en 20cm y que permite el desborde del agua introducida por los jets.

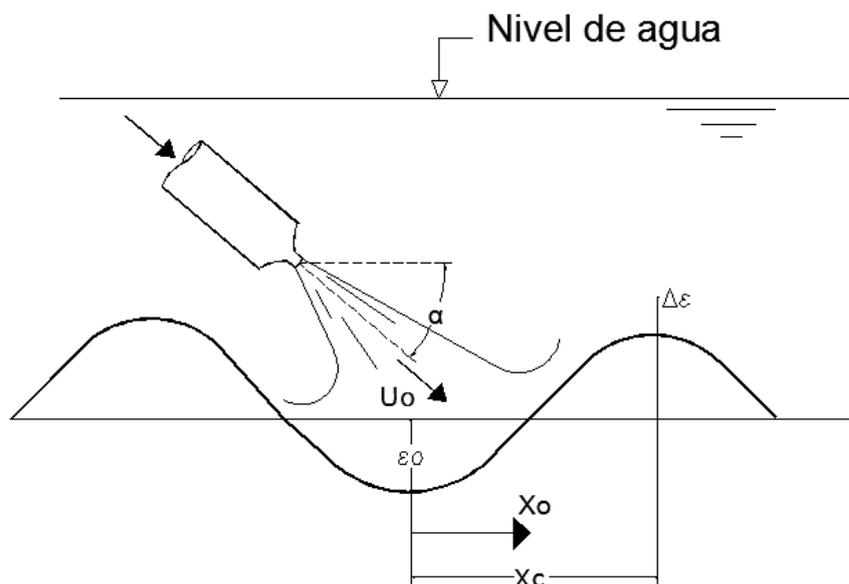


Figura 5 – Dispositivo Experimental

Estudios preliminares permitieron determinar que arena con un diámetro medio de 450 micrones es óptima para generar erosión en los rangos de caudales disponibles en este dispositivo experimental. El sedimento se distribuye en el fondo del canal como una capa plana horizontal de 5 cm de altura y 80 cm de longitud. La misma está confinada al inicio por una rampa de arranque y al final por una trampa de sedimento que permite la recolección y posterior pesado del sedimento desplazado.

Se realizaron diferentes ensayos en un lecho horizontal de arena, suponiendo dos (2) condiciones:

1. Jets fijos: En esta configuración la velocidad de avance de los jets es nula. Se varió el ángulo de inclinación de los jets y caudales, entre 1.50 y 3.00 litros/min. En este caso, se caracterizó la geometría del pozo (profundidad, ancho, etc).
2. Jets móviles: Se ensayaron diferentes velocidades de avance y caudales (2.0, 2.5, 3.0 litros/min) para ángulo de inclinación de los jets de 45°. Las velocidades de avance varían modificando el tiempo de permanencia del jet entre 15 segundos y 5 minutos, considerando una longitud de avance constante de 5cm. En estos ensayos, se midió la masa de sedimento transportado al final del recorrido del carro.



RESULTADOS

Jets fijos

Estas primeras experiencias se realizaron con el sistema de jets inmóvil en la zona central del lecho de arena permitiendo analizar el proceso de erosión por jets sumergidos hasta alcanzar el estado de equilibrio. En cada experimento se variaron el caudal, que determina la velocidad del flujo en la boca de cada jet y el ángulo de incidencia de los mismos sobre el lecho de arena y se midieron las longitudes características del pozo de socavación y de las dunas es decir, la profundidad máxima del pozo, el ancho y la altura de las dunas. La Tabla 1 muestra los parámetros explorados en este trabajo y los resultados obtenidos luego del análisis de imágenes (Figura 7).

Tabla 1 – Profundidad y ancho de pozo asintóticos para diferentes caudales y ángulo de inclinación de los jets.

Q	alfa	Profundidad máx. del pozo	Ancho Pozo
LPM	grados	cm	cm
2.0	20	1.10	5.80
2.5	20	1.60	7.80
2.0	45	1.10	4.90
2.5	45	2.50	9.60
3.0	45	2.10	9.80
1.5	90	1.30	5.20
2.5	90	1.80	8.30
3.0	90	2.30	8.50
3.7	90	2.33	

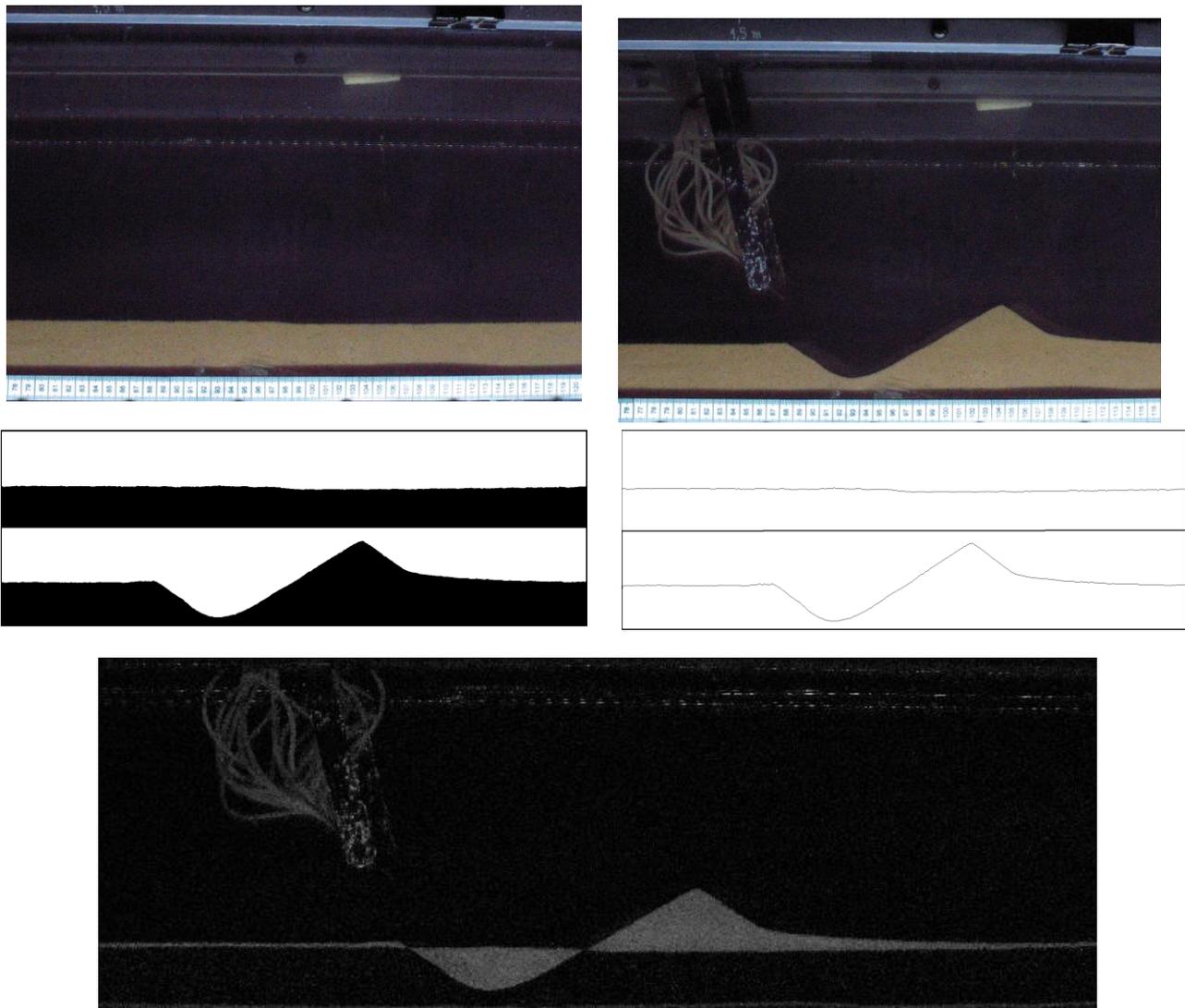


Figura 7 – Proceso de tratamiento de imágenes

Se compararon los resultados obtenidos de profundidad asintótica del pozo de erosión con los resultados de Rajaratnam. Para ello se graficó en la Figura 8 la profundidad del pozo adimensional con la altura de los jets respecto del número adimensional basado en el número de Froude $\frac{F_0}{\sqrt{\frac{H}{2b_o}}}$ que propone Rajaratnam en su trabajo.

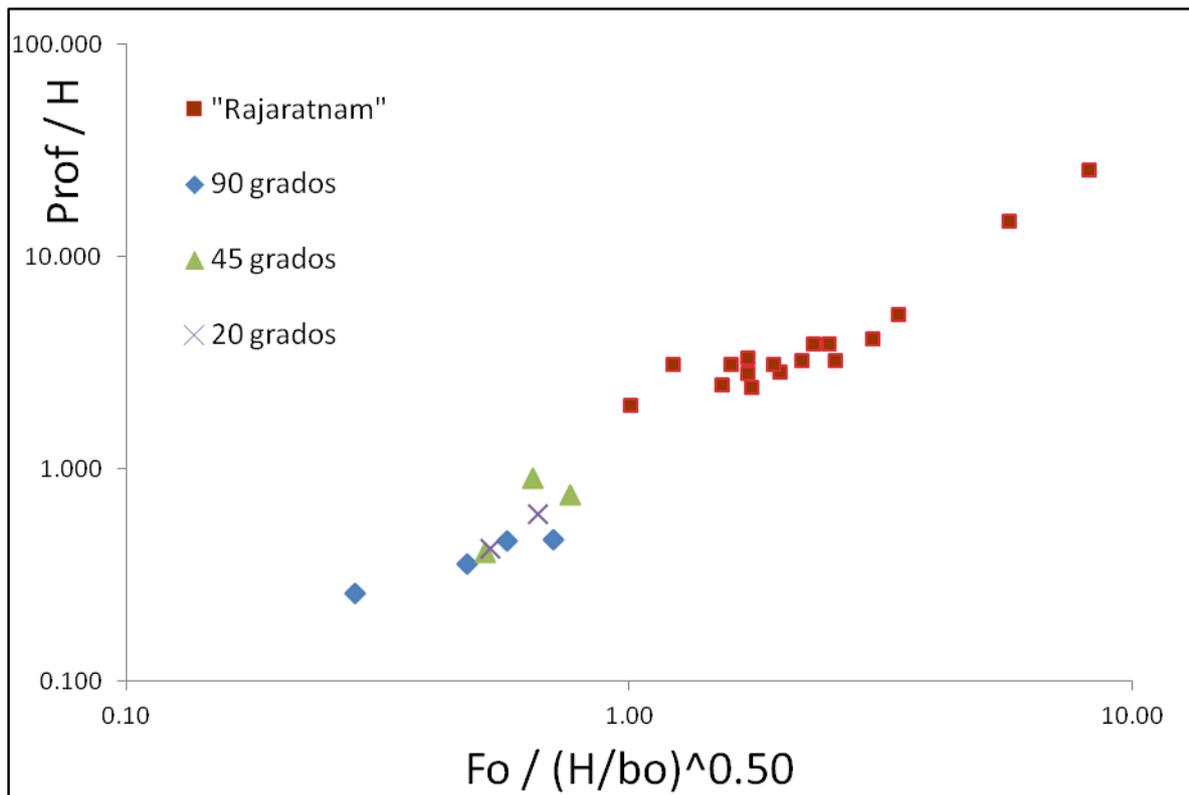


Figura 8 – Profundidad del pozo de erosión adimensional en función del número adimensional asociado al Froude.

En nuestro caso, el flujo emergente de cada boquilla de los jets se abre formando un frente de flujo continuo que impacta sobre el lecho de sedimento. Es por ello que en el cálculo del número de Froude se consideró la velocidad media del flujo como un frente continuo en todo el ancho del canal y no la velocidad en cada boca de jet.

Como puede observarse, la profundidad del pozo de erosión se incrementa con el número de Froude. Estos resultados experimentales están en buen acuerdo con los resultados de Rajaratnam.

Jets móviles

En esta configuración, los jets van avanzando una longitud fija de 5 cm en lapsos que se han variado entre 15 segundos y 5 minutos. Estas experiencias se realizaron para ángulos de incidencia de 45 grados y caudales de 2.0, 2.5, y 3.0 litros/min.

Con esta configuración móvil se quiere caracterizar la capacidad de barrido del sistema de jets. Las variables estudiadas fueron el caudal Q , los tiempos de permanencia entre cada estación del sistema de jets y la masa de sedimento transportada.

En la Tabla 2 se muestran las diferentes configuraciones de las experiencias y las masas obtenidas:

Q	alfa	Distancia de avance	Tiempo de Permanencia	Vavance	Masa
LPM	grados	cm	minutos	cm/min	gramos
2.0	45	5	0.033	150.0	19.90
2.0	45	5	0.25	20.0	56.10
2.0	45	5	0.40	12.5	49.40
2.0	45	5	0.50	10.0	78.80
2.0	45	5	0.75	6.7	82.60
2.0	45	5	1.00	5.0	43.20
2.0	45	5	1.50	3.3	99.00
2.0	45	5	2.00	2.5	74.00
2.0	45	5	3.50	1.4	162.60
2.0	45	5	5.00	1.0	197.30
2.5	45	5	0.033	150.0	33.10
2.5	45	5	0.25	20.0	111.80
2.5	45	5	0.40	12.5	108.30
2.5	45	5	0.50	10.0	121.00
2.5	45	5	0.75	6.7	144.30
2.5	45	5	1.00	5.0	215.00
2.5	45	5	1.50	3.3	216.50
2.5	45	5	2.00	2.5	177.00
2.5	45	5	3.50	1.4	355.80
2.5	45	5	5.00	1.0	443.50
3.0	45	5	0.033	150.0	22.50
3.0	45	5	0.067	75.0	62.60
3.0	45	5	0.25	20.0	126.10
3.0	45	5	0.40	12.5	155.60
3.0	45	5	0.50	10.0	164.00
3.0	45	5	0.75	6.7	156.90
3.0	45	5	1.00	5.0	188.00
3.0	45	5	1.50	3.3	260.70
3.0	45	5	2.00	2.5	326.00
3.0	45	5	3.50	1.4	460.60
3.0	45	5	5.00	1.0	556.80

Tabla 2 – Resultados de los ensayos con jets móviles

En la Figura 9, se grafican las masas en función del tiempo de permanencia para 2 de los distintos caudales ensayados:

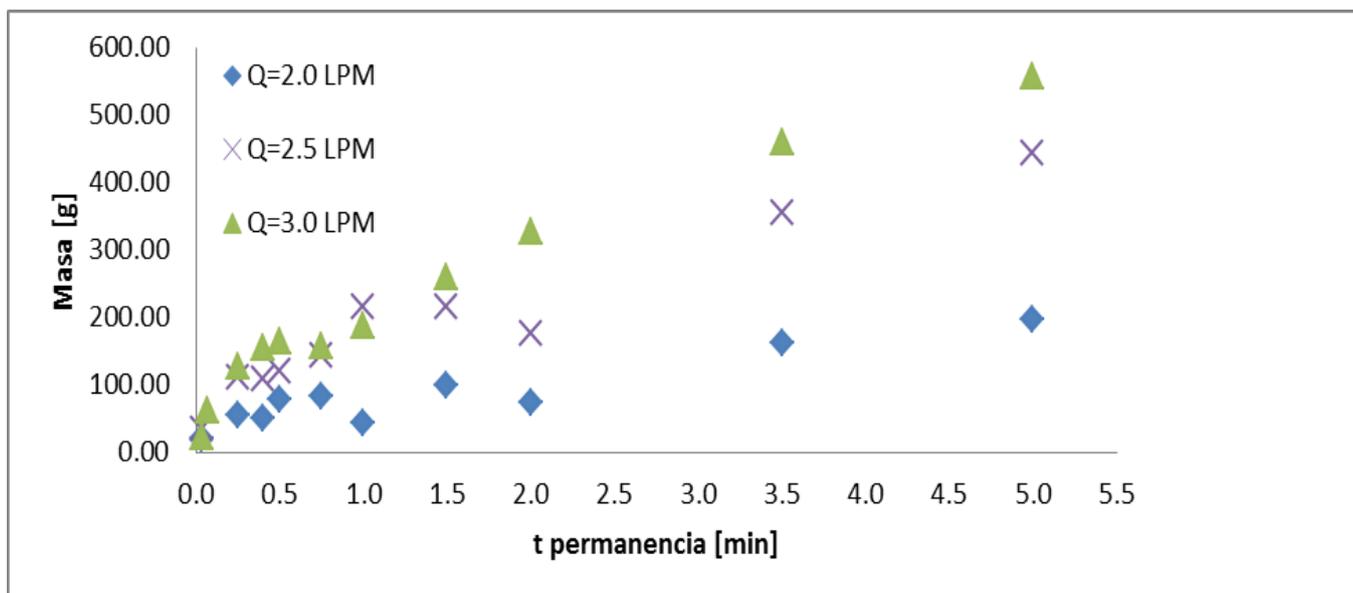


Figura 9 – Masa de sedimento transportada en función del tiempo de permanencia

Como puede observarse, a mayores caudales se obtienen mayores tasas de sedimento barrido en todo el rango de tiempos de permanencia estudiados. Para un caudal fijo, la masa de sedimento barrido se incrementa inicialmente con el tiempo de permanencia de los jets y en el caso de los caudales 2 LPM y 2.5 LPM parece alcanzarse un estado asintótico que es necesario explorar con más detalle completando las curvas presentadas.

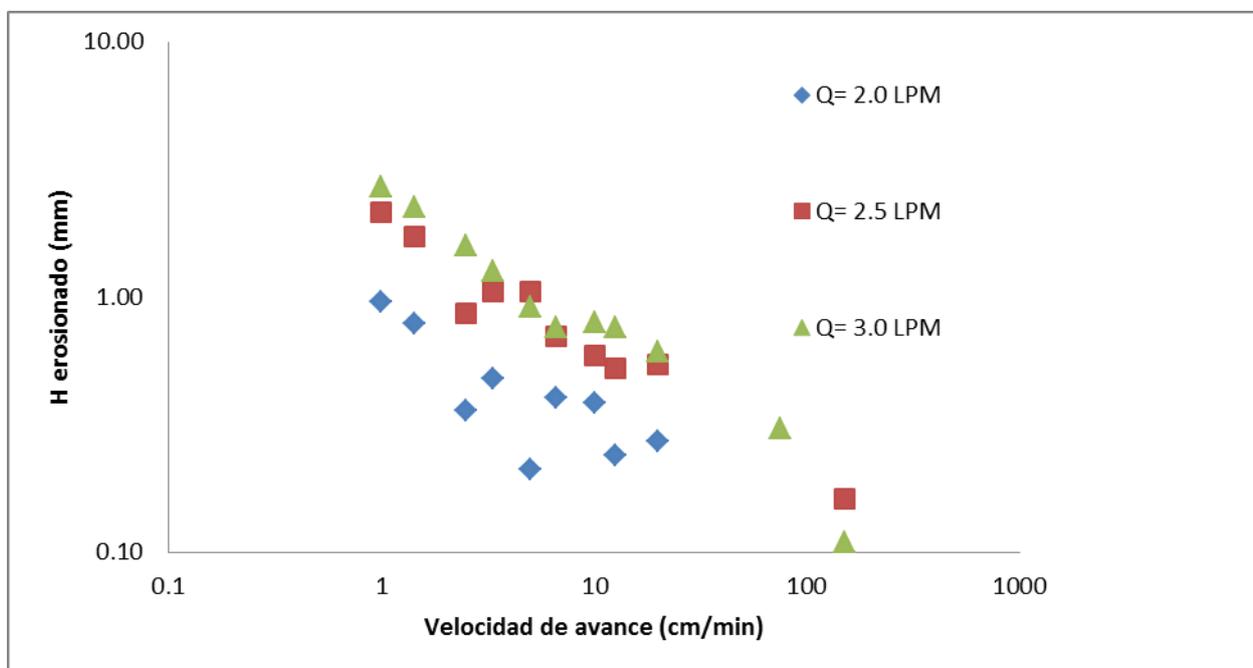


Figura 10 – Altura media de fondo erosionado en función de la velocidad de avance.

El objetivo que se quiere alcanzar con el avance del sistema de jets es el de transportar sedimento y consecuentemente erosionar el lecho. A partir de los resultados de masa transportada se calculó la altura media de lecho erosionado como:

$$(3) \quad h_{fondo} = \frac{M}{\rho_s \cdot B \cdot L \cdot (1 - \phi)}$$

donde ρ_s es la densidad del sedimento, B el ancho del canal, L la longitud del trayecto de los jets sobre el lecho y ϕ la porosidad de la arena considerado igual a 0.3.

En la Figura 10 se ha graficado la erosión media del lecho en función de la velocidad media de avance de los jets calculada como la distancia de avance que en este trabajo es constante e igual a 5 cm sobre el tiempo de permanencia en cada estación. Como puede observarse, la erosión media de la capa de sedimentos provocada por la acción de los jets es muy baja, del orden del milímetro. El avance de los jets, de una parada a la siguiente, en una distancia fija de 5 cm que es del orden del ancho del pozo, arrasa casi totalmente con la duna generada en la parada anterior y rellena en parte el pozo asociado. Si se analizan las imágenes obtenidas al final de carrera del sistema de jets, se observa la gran perturbación que producen los jets sobre el lecho generando una secuencia muy regular de pozos y dunas pero que tienen asociado una erosión global baja (Figura 11).

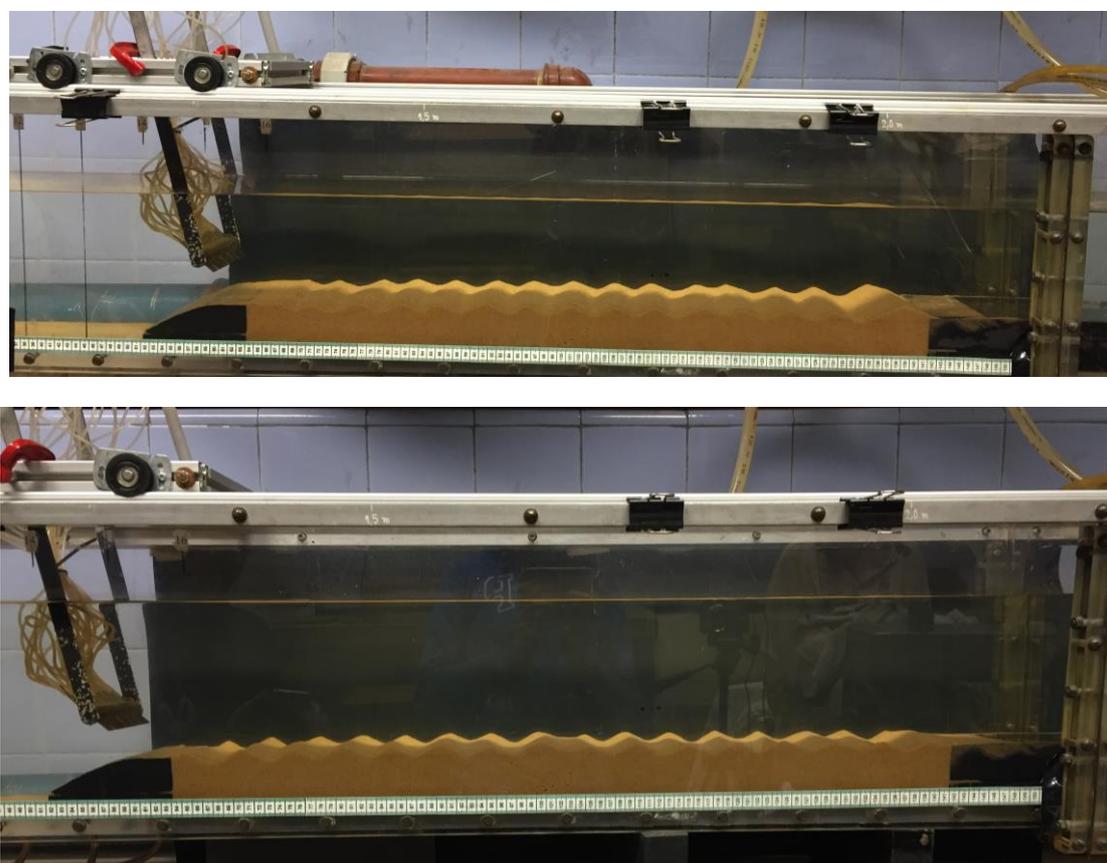


Figura 11 – Perfil del sedimento ensayado

CONCLUSIONES

Para la configuración de jets inmóviles se obtuvieron los perfiles del fondo erosionado para diferentes condiciones de ángulo de incidencia de los jets y de caudal. El tratamiento de las imágenes permitió determinar las longitudes características en el estado asintótico.

Se encontró que la profundidad máxima del pozo de erosión es función del número de Froude. Para el rango experimental estudiado, nuestros resultados concuerdan con los obtenidos por Rajaratnam.

En las experiencias realizadas con los jets móviles, se midió la masa transportada para los diferentes caudales estudiados. Como era de esperarse, a mayores caudales, mayor masa transportada y para un caudal fijo, la masa transportada aumenta con el tiempo de permanencia en cada parada. En el rango de parámetros ensayados, los jets producen una gran perturbación local de la capa de sedimentos pero con una baja eficiencia asociada a la erosión media del lecho. Estos resultados nos permiten suponer que la variable importante a ensayar para mejorar la eficiencia de barrido es la distancia de avance del sistema de jets.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Guerra D., Su J., Silva Freire A., *The Near Wall behavior of an Impinging Jet*.
- [2] Minatti L., Paris E., Solari L., *On the erosion due to inclined jets*.
- [3] Sequeiros O., Niño Y., García M., *Erosion of Sediment Beds by Turbulent Wall Jets in Combined-Sewer-Overflow Reservoirs*.
- [4] Francis J., McCreath P.S., *Bed Load transport by Submerged Jets*.
- [5] Hogg A., Dade W.B., Huppert H., Soulsby R., *A Model of an Impinging Jet on a Granular Bed, with Application to Turbulent, Event-driven Bedload Transport*.
- [6] Badr, S., Gauthier G. y Gondret P. *Erosion threshold of a liquid immersed granular bed by an impinging plane liquid jet*.
- [7] Rajaratnam N., *Erosion by Plane Turbulent Jets, Journal of Hydraulic Research*