



COMPARACIÓN DE DOS TIPOS DE ESTRUCTURAS PARA PREVENIR EROSIÓN DE MÁRGENES EN CURSOS DE GRAVA EN CLIMAS FRÍOS

Horacio Toniolo¹, Paul Duvoy², Alex Lai³

^{1,2} Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental -- Universidad de Alaska Fairbanks, Alaska, USA

³ Alyeska, Fairbanks, Alaska, USA

PO Box: 755900, Fairbanks, Alaska, USA Tel: 1-907-474-7977

E-mail: hatoniolo@alaska.edu - Web: <http://www.uaf.edu/civileng>

RESUMEN

La erosión de márgenes a lo largo de curvas de ríos es un proceso natural. Como resultado de esta erosión, los cursos tienden a desplazarse lateralmente. Este desplazamiento puede imponer riesgos a la infraestructura localizada en las cercanías del curso de agua. Para prevenir daños de obras civiles y/o viales, ingenieros desarrollaron varios tipos de estrategias para evitar la erosión de margen o para realinear la corriente, alejándola de la margen. Algunos diseños consideran estructuras orientadas hacia aguas arriba (i.e., tipo vertedero semi-sumergido), otros diseños consideran estructuras orientadas hacia aguas abajo (i.e. tipo espigón). Este trabajo presenta una evaluación de la performance de estos dos tipos de estructuras para prevenir erosión de márgenes en ríos de grava situados en regiones frías, como es el caso de ríos localizados en Alaska, USA. El análisis de los resultados de las tareas de campo, como también del análisis hidráulico de ambos tipos de estructuras de protección de márgenes indica que, en general, ambas estructuras están cumpliendo con el objetivo de desplazar la corriente principal fuera de la margen. Las estructuras orientadas hacia aguas arriba producen mayores erosiones de lecho en el extremo de las mismas, lo que podría beneficiar a los peces durante el invierno.

ABSTRACT

Bank erosion along river bends is a natural process. As a result of lateral erosion, streams tend to shift laterally and this displacement can impose serious risks to infrastructure. To avoid damage or destruction to the transportation system, researchers and engineers developed several types of strategies to prevent stream-bank erosion, including water course realignment, which moves it away from the bank. This research focuses on the evaluation of the performance of two different designs to prevent river bend erosion in arctic environments. The river training structures considered are barbs and vanes, which are oriented upstream and downstream respectively. The study sites were located in Alaska. Field work, numerical modeling and analysis were performed. As a result of these tasks, it was found that both structures displaced the thalweg from the river bank. Numerical results indicate that first and second barbs are critical for the entire river reach. Significant scour was detected at the tip of these barbs, which in turn could be beneficial for fish.

INTRODUCCIÓN

La erosión de márgenes a lo largo de curvas de ríos es un proceso natural. Como resultado de la erosión de margen, los cursos de aguas tienden a desplazarse lateralmente. Este desplazamiento puede imponer serios riesgos a la infraestructura localizada en las cercanías del curso de agua. Para prevenir daños o la destrucción de obras civiles y/o viales, investigadores e ingenieros han desarrollado varios tipos de estrategias para evitar la erosión de margen o para realinear el curso de agua, alejándolo de la margen. Algunos diseños consideran estructuras orientadas hacia aguas arriba (i.e., tipo vertedero semi-sumergido), otros diseños consideran estructuras orientadas hacia aguas abajo (i.e. tipo espigón).

Este trabajo presenta una evaluación de la performance de dos tipos de estructuras para prevenir erosión de márgenes en ríos de grava situados en regiones frías, como es el caso de ríos localizados en Alaska, USA. Específicamente, el estudio se enfoca en dos tipos de protecciones que son diametralmente opuestas. Por ejemplo, protecciones de márgenes orientadas hacia aguas arriba en el río Sagavanirktok (también conocido como río Sag), en las cercanías de Deadhorse, y hacia aguas abajo en el arroyo Hess.

El estudio involucró tareas de trabajo de campo, modelación numérica y análisis de los parámetros básicos de turbulencia. Las tareas de campo fueron realizadas durante 2009; la modelación numérica y análisis fueron finalizados en 2010.

SITIOS DE ESTUDIO

Arroyo Hess: El tramo bajo estudio se encuentra localizado a 120 km al norte de la ciudad de Fairbanks, y a 50 km al sur del río Yukon. El mayor oleoducto de Alaska (“Trans-Alaska pipeline”) cruza el arroyo a través de un puente metálico de 60 m de largo. La erosión de margen modificó el patrón del flujo de agua, creando un meandro aguas arriba del puente, originando una situación de riesgo para el oleoducto. Para prevenir adicional erosión sobre la margen, diez espigones direccionales fueron instalados a largo de 900 m del meandro. Los espigones manipulan la dirección del flujo, moviendo el arroyo hacia la zona de aguas poco profundas, antes de entrar a la zona del puente. Los espigones están orientados hacia aguas abajo. Una vista aérea de la zona es presentada en la Figura 1.



Figura 1.- Arroyo Hess durante estiaje. La dirección de flujo es desde abajo hacia arriba. El oleoducto cruza al arroyo en la parte central de la fotografía.

Río Sag: El tramo estudiado se encuentra en las proximidades de la ciudad petrolera de Deadhorse, en las cercanías del océano Ártico. En esta área, el río se desplazó peligrosamente hacia la margen izquierda, poniendo en peligro la estabilidad de la única ruta de acceso a Deadhorse. Para prevenir daños sobre la ruta, ocho estructuras tipo vertedero semi-sumergido fueron instaladas en el tramo del río. Estas protecciones están orientadas hacia aguas arriba, con un ángulo de 70° con respecto a la margen del río. La separación entre estructuras es el doble de la longitud de cada una de ellas. Una vista aérea de la zona protegida es presentada en la Figura 2.



Figura 2.- Río Sag, durante una condición de bajo caudal. La dirección del flujo es desde abajo hacia arriba. La ruta de acceso a Deadhorse se encuentra próxima al río. Polígonos naturales debido al deterioro de los suelos permanentemente congelados son visibles en la zona izquierda de la fotografía.

MÉTODOS

Los trabajos de campo consistieron en relevamientos batimétricos y mediciones de velocidades usando un sensor acústico doppler (o ADCP). El instrumento fue sincronizado con un sistema de posicionamiento global (o GPS) que contaba con corrección a tiempo real (RTK). El ADCP fue configurado con la máxima frecuencia de muestreo de datos.

La modelación numérica se realizó utilizando un modelo hidrodinámico bidimensional, el CCHE2D. Este modelo fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Mississippi. La caracterización de los parámetros turbulentos consistió en el cálculo de las tensiones de Reynolds

DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE CCHE2D

El modelo CCHE2D está basado en un método mixto de elementos finitos y volúmenes finitos para resolver la ecuación de continuidad en una malla desplazada y las ecuaciones de momento en una malla no desplazada. Este arreglo previene la oscilación numérica causada por una malla no desplazada donde los campos de velocidad y presión están desacoplados (Jia et al., 2002). El modelo es gratuito pero su código fuente no se encuentra disponible para el usuario.

Este modelo numérico bidimensional, integrado en la vertical, tiene la capacidad de simular flujos subcríticos, supercríticos, y transicionales (Jia y Wang, 2001) para evaluar los efectos de estructuras hidráulicas en la morfología del río y para predecir la erosión del lecho del río (Zhang, 2006).

El modelo CCHE2D se compone de CCHE-MESH, el software de generación de malla, el dominio computacional donde las ecuaciones son básicas son discretizadas, y de CCHE-GUI, la interface gráfica para modelo numérico.

Las ecuaciones básicas del modelo fueron descritas en detalle por Zhang (2006). La ecuación de continuidad toma la siguiente forma:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

donde Z representa la elevación de la superficie de agua; h es la profundidad local; t es el tiempo; u , v son las velocidades integradas en la vertical en las direcciones x e y respectivamente.

Las ecuaciones de momento integradas en la vertical para flujos bidimensionales turbulentos son las siguientes:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{xy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{cor} v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \left[\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} \right] - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{cor}u \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad; $\tau_{xx}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yy}$ son las tensiones de Reynolds integradas en la vertical; τ_{bx}, τ_{by} son las tensiones de corte de fondo; f_{cor} es el coeficiente de Coriolis; ν es la viscosidad cinemática; ρ es la densidad del agua.

Las tensiones turbulentas de Reynolds en (2) y (3) son aproximadas por las siguientes ecuaciones, asumiendo la validez de Boussinesq.

$$\tau_{xx} = 2\nu_t \frac{\partial u}{\partial x} \quad (4)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$\tau_{yy} = 2\nu_t \frac{\partial v}{\partial y} \quad (6)$$

donde ν_t es el coeficiente de viscosidad.

El cierre de los modelos turbulentos puede llevarse a cabo mediante un modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla, ó un modelo $k-\varepsilon$ bidimensional. Detalles sobre estos modelos fueron dados por Zhang (2006).

Limitaciones del modelo

Debido a que CCHE2D es un modelo bidimensional, no puede representar correctamente flujos helicoidales, los cuales se desarrollan en las pendientes exteriores de las curvas de un río y pueden llegar a ser un componente esencial en la formación de meandros (Tanner, 1960). En canales meandrosos, estos flujos secundarios afectan significativamente la distribución de la velocidad primaria y la tensión cortante del lecho. Las velocidades de estos flujos secundarios puede constituir el 10 al 20% de la velocidad de flujo primario (Pizzuto et al., 2008).

RESULTADOS

Los relevamientos batimétricos indican la presencia de importantes hoyos de erosión al final de cada uno de los elementos en ambas configuraciones (i.e., orientadas hacia aguas arriba y hacia aguas abajo). La magnitud de la erosión es menor en el Arroyo Hess (espigones—aguas abajo), mientras que la erosión registrada al final de algunos de los vertederos semi-sumergidos en el río Sag (vertederos semi-sumergidos – aguas arriba) alcanza profundidades de hasta 5 m.

El análisis de los perfiles de velocidad y los parámetros de turbulencia indica que la turbulencia es relativamente alta en la zona de aguas arriba (primer estructura) en el río Sag y que generalmente decrece hacia aguas abajo (Figura 3).

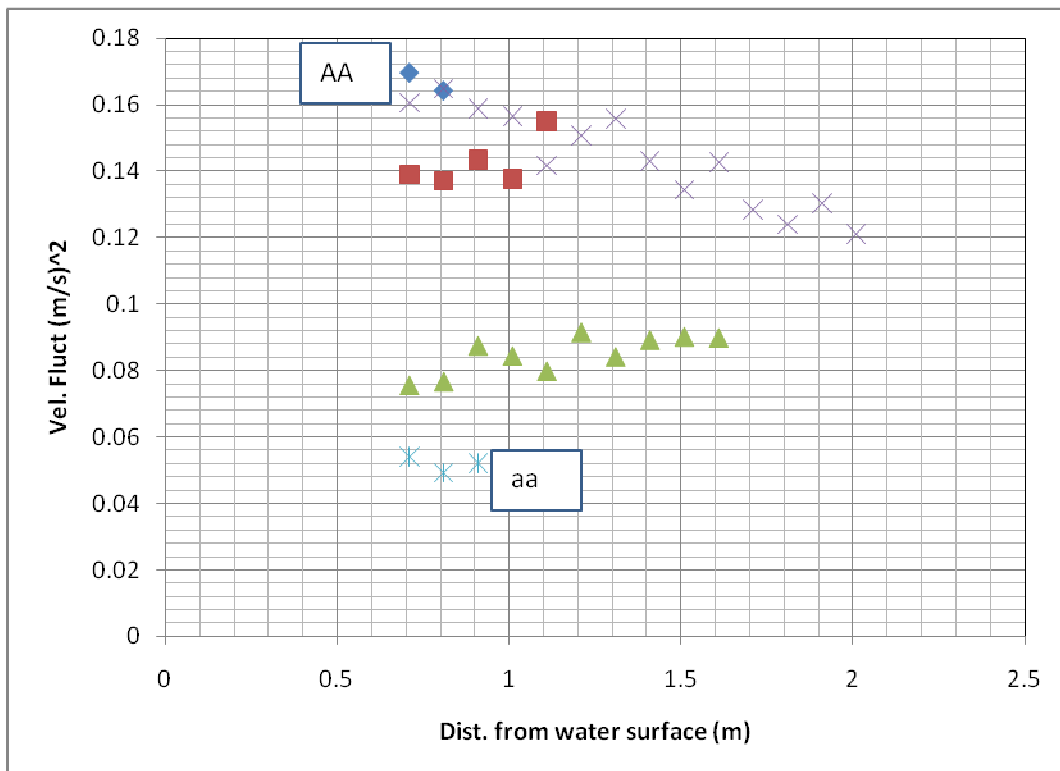


Figura 3.- Fluctuaciones de velocidad en la dirección este en el río Sag. Las fluctuaciones disminuyen en el sentido del escurrimiento.

Un análisis similar en el arroyo Hess indica que no hay un patrón definido en términos de turbulencia. Sin embargo, el gráfico de velocidades adimensionales (V/V_{max}) vs posición relativa (y/h) indica que los perfiles de velocidad son similares a lo largo del área de estudio (Figura 4). Así, se puede argumentar que el tramo de río se encontraba en equilibrio cuando los perfiles de velocidad fueron medidos.

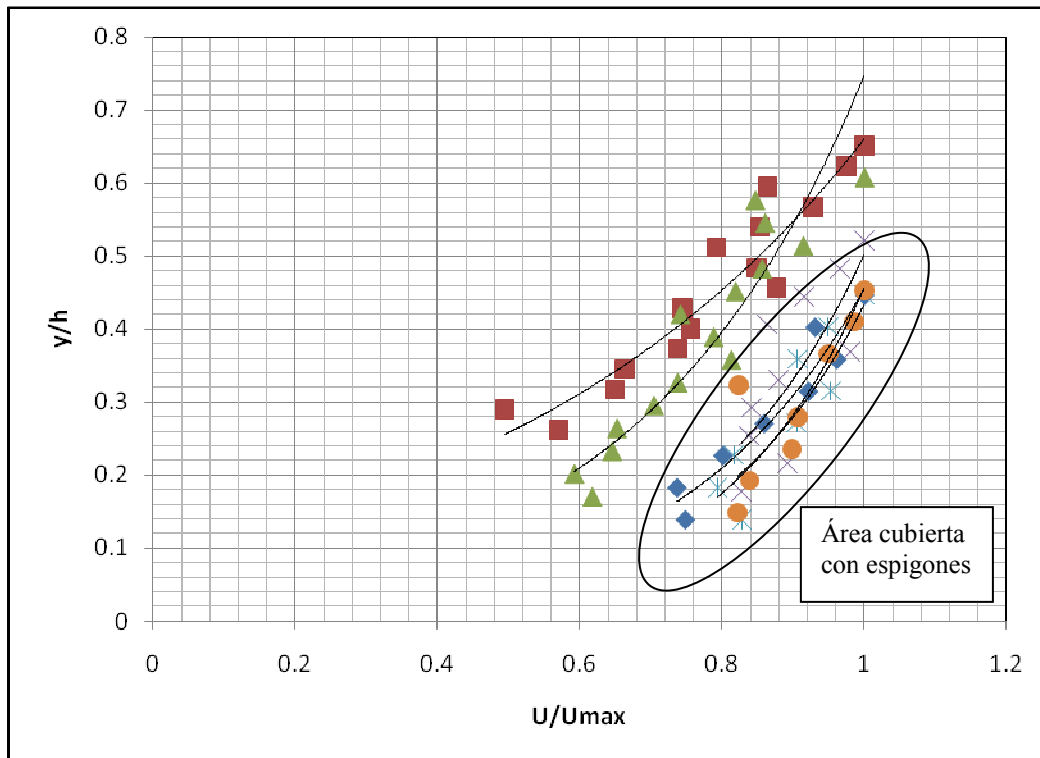


Figura 4.- Perfiles de velocidades adimensionales a lo largo del arroyo Hess.

Los resultados de la modelación hidrodinámica indican que el río Sag habría alcanzado una condición de equilibrio, en términos de tensiones de corte de fondo. Mientras que esta condición de equilibrio no habría sido alcanzada en el arroyo Hess. Así, erosión adicional debería esperarse en esa área.

El modelo matemático fue reconfigurado y corrido con varias alternativas, considerando un número menor de estructuras de protección a lo largo del dominio computacional. Los resultados obtenidos indican que la estabilidad de la primera protección es fundamental para la estabilidad de las siguientes estructuras. Así, los ingenieros deberían reforzar las estructuras localizadas aguas arriba. La Figura 5 muestra un ejemplo de alta tensión de corte en el sistema cuando el primer espigón fue removido del dominio computacional.

CONCLUSIONES

La compilación de los resultados de las tareas de campo, como también del análisis hidráulico de ambos tipos de estructuras de protección de márgenes indica que, en general, ambas estructuras están cumpliendo con el objetivo de mover la corriente principal fuera de la zona de la margen.

Desde un punto de vista integral, los resultados indican que las estructuras orientadas hacia aguas arriba producen mayores erosiones de lecho localizadas en el extremo de las mismas. Estos hoyos de erosión juegan un papel fundamental en la supervivencia de los peces durante los crudos meses de invierno, ya que estos pozos en el lecho del río mantienen el agua en estado líquido, ofreciendo así, un medio apto para los peces.

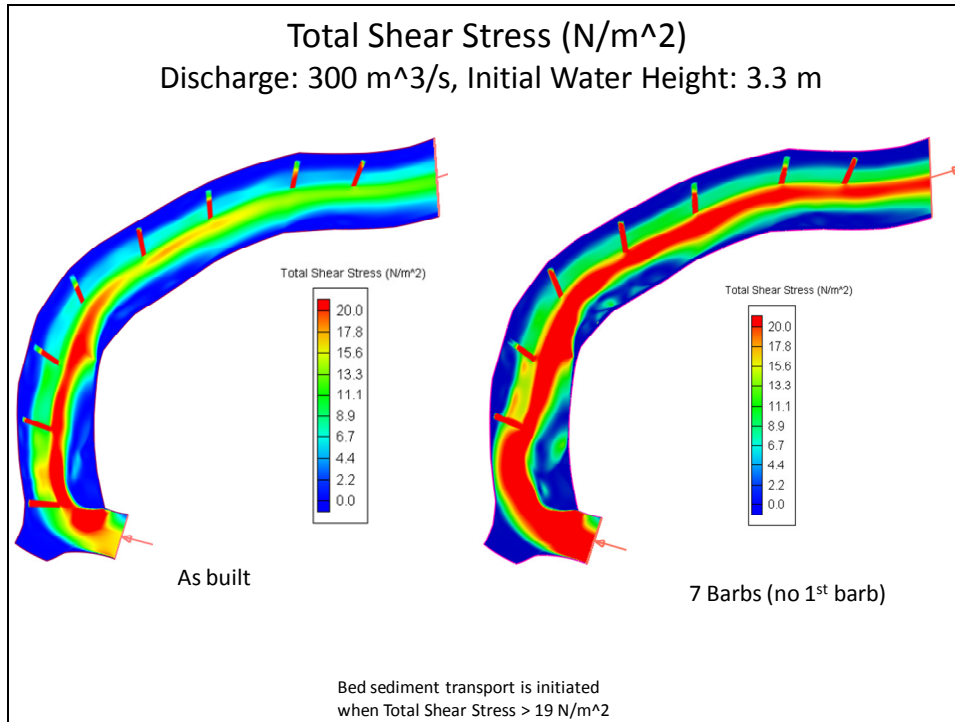


Figura 5.- Salidas del modelo matemático. Izquierda: condición actual. Derecha: El primer espigón fue removido

***Agradecimiento.** Esta investigación fue posible gracias al apoyo económico recibido a través del Centro de Transporte de la Universidad de Alaska Fairbanks, el Departamento de Transporte de Alaska y Alyeska como parte del proyecto N° 309009.*

LISTA DE SÍMBOLOS

f_{cor}	Coefficiente de Coriolis
g	aceleración de la gravedad
h	profundidad local
t	tiempo
U	magnitud de velocidad
u, v	componentes de velocidad en las direcciones x e y
Z	elevación de la superficie del agua
ν	viscosidad cinemática
ν_t	coeficiente de viscosidad
ρ	densidad del agua
τ_{bx}, τ_{by}	tensiones de corte
$\tau_{xx}, \tau_{xy},$	
τ_{yx}, τ_{yy}	tensiones de Reynolds

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Jia, Y., Wang, S., (2001). “CCHE2D verification and validation tests documentation.” National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2001-2, August.

Jia, Y., Wang, S., Yichun, X., (2002). “Validation and application of a 2D model to channels with complex geometry.” *International Journal of Computational Engineering Science* 3, 57-71.

Pizzuto, J.E., ASCE Task Committee on Hydraulics, Bank Mechanics, and Modeling of River Width Adjustment, (2008). “Streambank erosion and river width adjustment”. In: García, M.H. (Ed.) ASCE Manual of Practice 110 – Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling and Practice, ASCE Publications, 387-438

Tanner, W.F., (1960). “Helicoidal flow, a possible cause of meandering.” *Journal of Geophysical Research* 65(3), 993-995.

Zhang, Y., (2006). “CCHE-GUI – Graphical Users Interface for NCCHE Model User’s Manual – Version 3.0”. National Center for Computational Hydroscience and Engineering, Technical Report No. NCCHE-TR-2006-2. October.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Cient. y Tec.



Gobierno Prov. de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



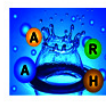
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo, Ciencia y Tecnología



Consejo Prof. de la Ingeniería y Arq.



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investig. Hidroamb.



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

