

DOI: 10.24850/j-tyca-2026-04-03

Artículos

Efectos en la morfología fluvial inducidos por obras de protección de márgenes

Effects on fluvial morphology induced by river-bank protection

Rafael Niño-Vega¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0400-8946>

Andrés Vargas-Luna², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5317-8975>

¹Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, rafael.nino@javeriana.edu.co

²Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, avargasl@javeriana.edu.co

Autor para correspondencia: Andrés Vargas-Luna, avargasl@javeriana.edu.co

Resumen

La intervención antrópica en cauces naturales con frecuencia induce un aumento de la erosión en sus márgenes, un fenómeno que se aborda por lo común mediante la construcción de diques y espigones. Estas estructuras buscan reducir la velocidad del flujo y la turbulencia en las cercanías de las bancas del cauce, limitando su migración natural. Sin

embargo, esta restricción de la dinámica fluvial favorece los procesos de sedimentación y erosión, alterando la geometría y morfología de los cauces. A menudo, las obras de protección se implementan sin considerar los efectos que pueden generar en la margen opuesta. El objetivo de este estudio es evaluar, mediante un modelo numérico bidimensional, los efectos inducidos por dichas obras en la morfología de las márgenes no protegidas. Los resultados indican que, a mayor inclinación en planta de las estructuras y a mayor longitud de estas, se incrementa el control sobre los procesos naturales en las márgenes. Además, cuando ambas márgenes son protegidas, se observa una mayor reducción de la erosión en la zona aguas arriba, en comparación con la intervención unilateral de la zona afectada.

Palabras clave: ingeniería fluvial y lacustre, erosión del suelo, sedimentación, río, modelos matemáticos, hidrodinámica, geomorfología.

Abstract

Human intervention in natural river channels often leads to increased erosion along their banks, a phenomenon that is commonly tackled by building dams and breakwaters. These structures aim to reduce the flow velocity and turbulence near the banks of the channel, limiting their natural migration. However, this restriction of river dynamics favors sedimentation and erosion processes, altering the geometry and morphology of the channels. Often, protective works are implemented without considering the effects they may have on the opposite bank. The objective of this study is to evaluate, using a two-dimensional numerical model, the effects induced by such works on the morphology of unprotected banks. The results indicate that the greater the slope of the

structures and the longer their length, the greater the control over natural processes on the banks. In addition, when both banks are protected, there is a greater reduction in erosion in the upstream area compared to unilateral intervention in the affected area.

Keywords: river and lake engineering, soil erosion, sedimentation, rivers, mathematical models, hydrodynamics, geomorphology.

Recibido: 01/08/2025

Aceptado: 19/09/2025

Publicado *ahead of print*: 27/10/2025

Versión final: 01/07/2026

Introducción

La intervención humana sobre los sistemas hídricos se ha venido desarrollando durante más de 4 000 años. Sin embargo, solo desde la década de 1950 se han realizado estudios y análisis para saber qué cambios sufren los ríos debido a las actividades antrópicas (Gregory, 2006). Los estudios realizados durante los inicios de la hidráulica fluvial se enfocaron en el análisis del régimen hidrológico y sus efectos en las características hidráulicas de los cauces, sin considerar las contribuciones relacionadas con el transporte de sedimentos (Gilbert, 1917). Sin embargo, los avances recientes en este campo establecen que los estudios asociados con las cuencas hidrográficas y los sistemas fluviales no pueden ser concebidos sin considerar los sedimentos transportados y las intervenciones antrópicas a las que estos sistemas están comúnmente expuestos (Overeem *et al.*, 2013).

La intervención del ser humano está incidiendo de manera significativa en los procesos naturales y como consecuencia de esto se presentan cambios en los caudales de los ríos, en su carga de sedimentos y por lo tanto en su morfología. Además de los cambios vinculados con el calentamiento global y el cambio climático, los principales impactos en la morfología fluvial son inducidos por modificación en el uso del suelo, variación de coberturas vegetales, urbanización, construcción de presas y embalses, enderezamiento de canales, y la construcción de diques y muros. La finalidad de este último tipo de estructuras es restringir la dinámica de las bancas del cauce, afectando su migración natural (Meade & Moody, 2009). Además, las estructuras varían en dimensión dependiendo del tipo de zona a proteger; las estructuras de protección de gran extensión están ubicadas por lo general en zonas urbanizadas (Jianchun *et al.*, 2014). Esta restricción de la dinámica natural de los ríos aumenta los procesos de sedimentación y erosión, modificando la geometría de los cauces y su morfología.

En las curvas de los ríos, el flujo se concentra hacia la margen externa, causando procesos de erosión y generando sedimentación en la margen interna en donde las velocidades y profundidades son mucho menores (Motta *et al.*, 2012). De acuerdo con lo anterior, el estudio de los efectos en la dinámica fluvial inducidos por obras de protección es necesario para la ingeniería y para la gestión de estos hidrosistemas, considerando aspectos como el control de inundaciones, la navegación y la protección del territorio e infraestructura (Güneralp *et al.*, 2012). Se ha observado que si bien las obras de protección intervienen de manera local sobre las márgenes del cauce, no se extienden para proteger las márgenes opuestas. Este enfoque limita la protección a áreas específicas, sin considerar los efectos negativos que puedan surgir en las márgenes

no intervenidas. Este tipo de evaluación, que incluye tanto la protección de las márgenes como su interacción con las márgenes opuestas, no ha sido previamente considerado en el desarrollo de estudios numéricos bidimensionales.

Los modelos numéricos se han consolidado como herramientas fundamentales para el análisis y la simulación de la dinámica morfodinámica en cauces naturales. Su capacidad para representar procesos morfodinámicos y la dinámica de márgenes ha permitido avances significativos en la comprensión de la evolución de los cauces bajo diversas condiciones hidrológicas e hidráulicas. Las principales fortalezas de estos modelos radican en su versatilidad, pues permiten la simulación de escenarios complejos que incluyen variaciones temporales y espaciales, algo difícil de abordar mediante enfoques experimentales o analíticos convencionales. Además, los modelos numéricos permiten integrar distintos factores físicos y geotécnicos, lo que hace posible la evaluación de intervenciones a largo plazo en la morfología fluvial. En la actualidad, existen modelos ampliamente validados como HEC-RAS, MIKE 21, e iRIC que han sido aplicados con éxito en una variedad de estudios de ingeniería fluvial (Yen, 1992). Estos avances han facilitado no solo el estudio de la evolución de los cauces, sino también la optimización de las intervenciones humanas para mitigar la erosión y mejorar la estabilidad fluvial. En este sentido, los modelos numéricos son herramientas esenciales en los estudios morfológicos, ya que proporcionan un marco cuantitativo para evaluar la dinámica fluvial.

El avance en el estudio de los sistemas fluviales se ha generado a partir de casos reales que cuentan con información de campo detallada, como el análisis de cauces hipotéticos contruidos con información sintética (Brown *et al.*, 2014). La representación sintética de cuerpos de

agua puede ser generada física o virtualmente (Abad & García, 2005; Brown *et al.*, 2014; Xu & Bai, 2013), y es un componente sustancial para la investigación y el análisis de cauces con configuraciones determinadas (Rodríguez-Iturbe & Rinaldo, 2001). La generación de morfologías sintéticas se ha trabajado con diferentes métodos enfocados en diferentes condiciones morfodinámicas y variedad de escalas espaciales.

Las geometrías sintéticas permiten simplificar las configuraciones de los cauces y las márgenes, controlando los parámetros geométricos para facilitar la simulación de diversos escenarios, como la erosión, sedimentación y migración de meandros. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en la investigación de la morfodinámica fluvial, permitiendo la evaluación de intervenciones de forma más controlada y sistemática (De Boer *et al.*, 2005). En los estudios que utilizan esta aproximación se ha demostrado que los modelos generados pueden simular de manera eficaz el comportamiento de los cauces, aunque algunos autores advierten que la simplificación de la geometría limita la capacidad de los modelos para capturar las complejidades de los cauces naturales (Lesser *et al.*, 2007). A pesar de ello, los modelos con geometría sintética siguen siendo herramientas valiosas para estudiar la respuesta morfodinámica a intervenciones específicas, especialmente en condiciones controladas y en estudios de largo plazo. Por ejemplo, el trabajo de Bermúdez (2013) ha demostrado que estos enfoques pueden proporcionar resultados útiles en el análisis de la evolución de cauces artificiales y el impacto de las modificaciones geométricas sobre la dinámica del flujo. Además, estudios como el de Ferguson (2012) han subrayado que aunque los modelos con geometría sintética no siempre replican con exactitud las características naturales son extremadamente

útiles para el diseño de medidas de intervención, así como para la predicción de patrones generales de erosión y sedimentación.

El objetivo de esta investigación es evaluar la respuesta morfológica tanto local como aguas abajo de la zona intervenida generada por diferentes escenarios de protección de márgenes empleando un modelo numérico. Se analizan diferentes casos de intervención de márgenes, donde se plantean muros de protección y espigones. Con el fin de evaluar los efectos en la morfología generados con cada alternativa, los casos planteados se comparan con el caso sin intervención, considerado como el caso de referencia, manteniendo las condiciones iniciales en los diferentes escenarios.

Materiales y métodos

En la presente investigación se realizaron modelaciones numéricas de cauces sintéticos, tomando en cuenta escenarios de intervención, donde se protege una sola margen (la margen afectada) y escenarios donde se protegen las dos márgenes (margen afectada y margen opuesta). Inicialmente, y a fin de evaluar el potencial del modelo morfodinámico seleccionado, se emplearon los resultados obtenidos de un estudio experimental para hacer modelaciones y evaluar la sensibilidad de los parámetros utilizados para la evolución de márgenes. Luego de la evaluación de los parámetros del modelo computacional se generaron morfologías sintéticas con características que reflejan las condiciones de un tramo de río real. Se seleccionó un tramo de río cuyo material del lecho tiene características similares al utilizado en la calibración del modelo morfodinámico (lecho arenoso), para asegurar la coherencia entre el modelo de laboratorio calibrado y las condiciones del caso de estudio.

En el estudio no se hizo un proceso de escalamiento entre el cauce experimental y las condiciones del río real, dado que las características físicas del cauce natural no guardan relación directa con el experimento. Después se ejecutaron las modelaciones numéricas considerando las obras de protección de márgenes.

Modelo numérico

En esta investigación se seleccionó el modelo numérico bidimensional iRIC (<https://i-ric.org>). Se tuvo en cuenta que este modelo incluye módulos específicos que describen la erosión y acreción de bancas; procesos físicos de interés en nuestro proyecto. Este modelo numérico incluye una amplia gama de solucionadores (Tabla 1). Para el desarrollo del presente trabajo se empleó el solucionador Nays2DH, considerado el más apto para las necesidades del proyecto, dado que cuenta con un módulo que simula la erosión de márgenes.

Tabla 1. Solucionadores disponibles del modelo numérico iRIC.

Nombre	Dimensión	Variación de velocidad	Sistema de coordenadas	T.S./E.L./E.B.	Refinamiento de malla
FastMECH	2D Quasi-3D	Cuasi-permanente	Curvilínea ortogonal	S-S-N	N
Morpo2DH	2D	No permanente	Curvilínea no ortogonal	S-S-N**	N
NAys2DH	2D	No permanente	Curvilínea no ortogonal	S-S-S	N
Nays2dFlood	2D	No permanente	Curvilínea no ortogonal	N-N-N	N
NaysCUBE	2D	No permanente	Curvilínea no ortogonal	Y/Y/N	N
Storm	2D	No permanente	No estructurada-triangular	N-N-N	S
River2D	2D	No permanente	No estructurada-triangular	N-N-N	S
CERI1D	1D	No permanente	NA	N	
Mflow02	2D	No permanente	No estructurada-triangular	S-S-N	S
SRM	NA	No permanente	NA	N-N-N	N
NaysEddy	3D	No permanente	Ortogonal estructurada	S-S-N	S
ELIMO	2D	No permanente	Curvilínea ortogonal	N-N-N	N

**Capacidad de flujo de lodo y escombros.

T. S. = transporte de sedimentos.

E.I. = evolución de lecho.

E. B. = erosión de bancas.

Fuente: modificado de Nelson *et al.* (2016).

Información experimental

La modelación numérica está compuesta, en general, por cuatro fases: construcción, calibración, validación y aplicación (Thomann, 1998). Un modelo numérico es confiable no solo con base en la construcción de este y de los datos de entrada, sino también en la fase de calibración (Shoarinezhad *et al.*, 2020); la precisión de los resultados obtenidos a

partir de simulaciones numéricas está en función de la fase de calibración (Evangelista *et al.*, 2017). El objetivo de la calibración es reducir la incertidumbre ajustando el modelo de acuerdo con las comparaciones realizadas entre los resultados de las observaciones y los resultados del modelo numérico (Oberkamp *et al.*, 2004). Por tanto, para la evaluación del potencial del modelo morfodinámico seleccionado se utilizaron los resultados obtenidos en el estudio de laboratorio realizados por Vargas-Luna *et al.* (2019), en donde se observó en detalle el fenómeno de erosión de márgenes (Figura 1).

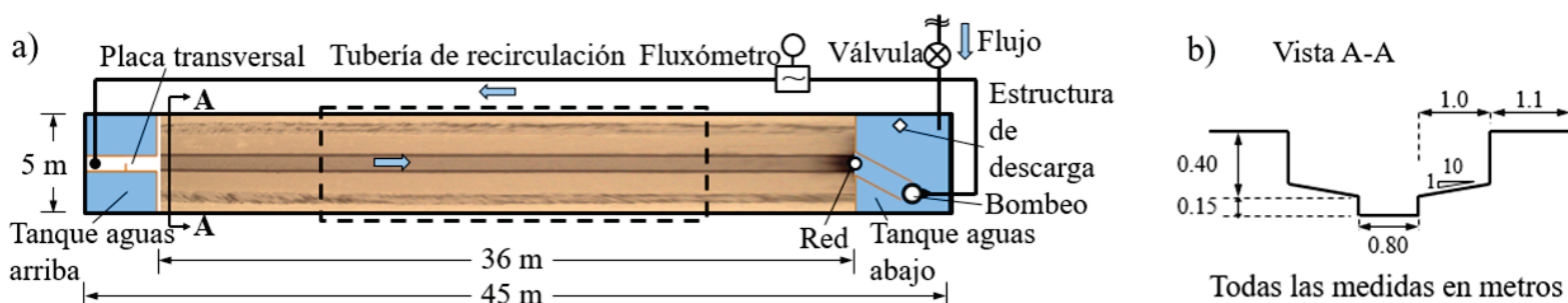


Figura 1. Configuración experimental del canal de lecho móvil: a) vista en planta; b) configuración inicial de la sección transversal A-A'. Tomado de Vargas-Luna *et al.* (2019).

Validación y calibración del modelo numérico

A pesar de los enfoques automáticos utilizados para calibrar modelos hidrológicos, aún se consideran confiables los procesos de calibración manual en modelación morfodinámica (Evangelista *et al.*, 2017). Con el modelo morfodinámico iRIC se realizaron modelaciones para diferentes tiempos considerados en el estudio de laboratorio seleccionado (Vargas-Luna *et al.*, 2019); esto, con el fin de conocer la respuesta del modelo y

por tanto la sensibilidad de los parámetros morfodinámicos utilizados en el componente del estudio de la evolución de márgenes.

Estas modelaciones preliminares consideraron el proceso de erosión en dos zonas definidas en el estudio experimental: tramos rectos antes de la curva y un tramo con una curva. El proceso de calibración se efectuó en dos etapas: 1) calibración hidrodinámica, donde se ajustó el coeficiente de rugosidad de Manning; y 2) calibración morfodinámica, en la que se ajustaron flujo secundario y factor morfológico; el ángulo de reposo se mantiene igual para las modelaciones realizadas, considerando que las características del lecho no varían. Posteriormente, se evaluaron las aproximaciones que el modelo computacional ofrece en cuanto a la dinámica de márgenes. En la Tabla 2 se presentan los escenarios simulados para definir el coeficiente de rugosidad del tramo analizado.

Tabla 2. Calibración hidrodinámica.

ID modelo hidrodinámico	Coeficiente de rugosidad de Manning (n_o)		Caudal (l/s)	Tiempo de modelación (h)
	Tramo 1	Tramo 2		
1	0.015	0.013	45	2.0
2	0.017	0.015	45	2.0
3	0.017	0.017	45	2.0
4	0.015	0.015	45	2.0
5	0.015	0.011	22	9.0
6	0.016	0.011	22	9.0
7	0.017	0.012	22	9.0
8	0.017	0.010	22	9.0

Definido el coeficiente de rugosidad de Manning, en la segunda etapa de calibración se llevaron a cabo modelos con el fin de calibrar parámetros morfodinámicos del modelo computacional iRIC: flujo secundario y factor morfológico. El parámetro del flujo secundario considera el movimiento del agua que no sigue la dirección longitudinal del flujo. El factor morfológico es un multiplicador que se aplica en la ecuación de sedimentos para reducir el tiempo de cálculo (Morgan *et al.*, 2020). Luego de este proceso se analizó la variación del lecho (vista en planta) (Shoarinezhad *et al.*, 2020). Las simulaciones realizadas se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Calibración morfodinámica.

ID modelo morfodinámico	Periodo de modelación (h)	Factor de flujo secundario	Factor morfológico
A	9-11	-	-
B		7	-
C		10	-
D		1	-
E		1	1.5
F		1	3
G		-	3
H		-	6
A	86-88	-	-
B		7	-
C		10	-
D		1	-
E		1	1.5
F		1	3
G		-	3
H		-	6

Tiempo de modelación: 2 h.

Caudal: 45 l/s.

En la calibración morfodinámica del modelo se tomaron los niveles del lecho del modelo experimental y del modelo computacional, y se realizó una diferencia entre los valores obtenidos en cada modelo; esto se hizo para cada modelo de la Tabla 3.

Características del tramo de estudio

Para el desarrollo del estudio con morfologías sintéticas, y a fin de manejar parámetros geométricos e hidráulicos reales, se tomaron las características físicas de un tramo del río Orito, a la altura del municipio de Orito, Putumayo, Colombia (Figura 2). Este tramo de río ha sido afectado por problemas de erosión de bancas durante la última década.



Figura 2. Localización del tramo seleccionado del río Orito (Putumayo), Colombia.

Morfología sintética

Considerando las diferentes ecuaciones que pueden representar sistemas fluviales —para la forma en planta—, las curvas generadas por la función seno representan la forma simétrica de un sistema fluvial, lo cual permite

apreciar la sinuosidad de este (Leopold & Langbein, 1966). Sin embargo, los patrones de un sistema fluvial son complejos, y la asimetría en ríos sinuosos es más frecuente (Parker & Andrews, 1986; Parker *et al.*, 1983). Por tanto, en este estudio se consideran dos formas en planta empleando las curvas tipo Kinoshita (1961) para dos valores de amplitud angular máxima (θ_0) de 15 y 40°, respectivamente. Por otra parte, para la representación de las secciones transversales se han usado relaciones lineales y exponenciales para describir la pendiente transversal del lecho en la zona de la curvatura de los ríos, donde las profundidades resultan excesivas y poco realistas. En consecuencia, se empleó la función de Beck (1988), que representa la forma del lecho de manera aproximada, considerando parámetros como el ancho del canal, profundidad de flujo y curvatura del río. En la Tabla 4 se presentan las ecuaciones para definir la planta del cauce Kinoshita (1961) y la geometría de las secciones transversales (Beck, 1988).

Tabla 4. Ecuaciones para generar morfología sintética.

Ecuación	Descripción
$\theta = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi s}{\lambda}\right) + \theta_0^3 \left(J_s \cos\left(3 \frac{2\pi s}{\lambda}\right) - J_f \sin\left(3 \frac{2\pi s}{\lambda}\right) \right)$	θ_0 = amplitud angular máxima s = coordenada de flujo λ = longitud de onda de arco J_s = coeficiente de asimetría J_f = coeficiente de amplitud
$A = 3.8 \left(1.0 + \frac{B^*}{6.96h} \exp\left(\frac{-6.96h}{B^*}\right) \right)$	A = pendiente de lecho transversal B^* = mitad del ancho de la sección transversal h = profundidad hidráulica
$h_0 = \left(1 - \frac{\widetilde{h}_c}{S_t n} \right) \parallel -S_t n, 0 \parallel + \frac{\widetilde{h}_c}{S_t n} \exp\left(-S_t \frac{n}{h}\right) \parallel -S_t n, 0 \parallel$ $C_t = \frac{\delta \theta}{\delta s}$ $S_t = -AhC_t$	S_t = pendiente transversal (parámetro relacionado con la curvatura del canal C_t) h_0 = profundidad de flujo a través de la sección
$\widetilde{h}_c \approx \frac{4B^+ h S_t - S_t^2 B^{+2}}{2B^+ S_t + 2h - 2h \exp\left(- S_t \frac{B^+}{h}\right)}$	$\widetilde{h}_c$ = profundidad en el centro de la sección
$\eta = h - \left(1 - \frac{h_c}{S_t n} \right) \parallel -s_t n, 0 \parallel + \frac{h_c}{S_t n} \exp\left(-s_t \frac{n}{h}\right) \parallel s_t n, 0 \parallel$ $\eta = h - h_0$	η = elevación del lecho s, n = coordenadas del flujo $\parallel A, B \parallel$ = valor máximo entre A y B

Se desarrolló un código en Matlab para generar la nube de puntos que representaran las morfologías sintéticas. La información que alimenta la nube de puntos corresponde a parámetros del cauce como ancho, longitud de cauce, ancho de la llanura de inundación, pendiente

longitudinal y pendiente de los taludes. Para definir los puntos adicionales al eje, se trabajó con coordenadas curvilíneas ortogonales s y n . Debido a los dos sistemas de coordenadas existentes, fue necesario realizar la transformación de sistema curvilíneo ortogonal a sistema cartesiano. Los parámetros se definen con base en la información del tramo del río mencionado y se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetros físicos para generar morfología sintética.

Característica	Unidades	Amplitud angular máxima θ_0	
		15	40
Ancho de río (B)	m	80	80
Pendiente (s_0)	m/m	0.6	0.6
Profundidad	m	13	13
Longitud de tramo	m	2 500	2 800
Coefficiente de rugosidad de Manning (n_0)	-	0.04	0.04
Sinuosidad (I_s)	-	1.03	1.16
Caudal (2.33 años)	m ³ /s	190	190
Diámetro sedimento	mm	5.45	5.45
Longitud de onda de arco (λ)	-	1 355	1 505
Coefficiente de asimetría (J_s)	-	0.029	0.029
Coefficiente de amplitud (J_f)	-	0.005	0.005

Con el código de Matlab definido, se construyeron dos morfologías sintéticas. La primera morfología sintética (Figura 3a) representa un cauce con sinuosidad baja ($I_s = 1.03$); la segunda morfología sintética (Figura 3b) corresponde a un cauce con sinuosidad media ($I_s = 1.16$). En

la Figura 3 se define la margen externa de la curva 1 (C1) como la zona crítica (que requiere protección) y la margen opuesta, localizada en la curva 2, como la zona aguas abajo de la zona intervenida.

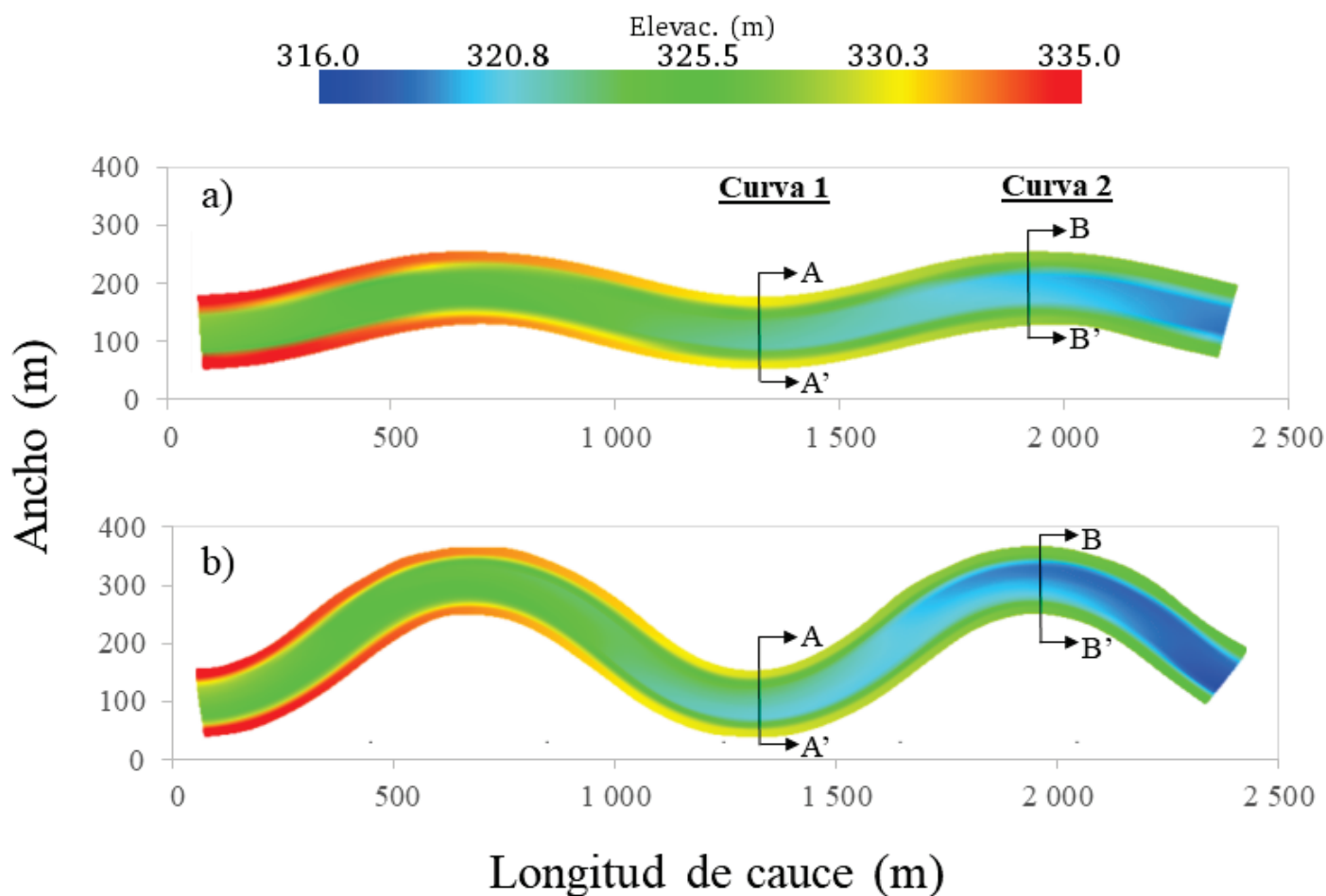


Figura 3. Morfologías sintéticas generadas: a) cauce curvatura baja y b) cauce curvatura media. Flujo de izquierda a derecha.

Escenarios de modelación

Las simulaciones se iniciaron con las geometrías sintéticas descritas en la sección anterior, pero el modelo se dejó correr un tiempo computacional de seis meses para que el lecho del cauce sintético se ajustara al flujo, empleando un factor morfológico de cinco. El periodo de modelación se definió con base en la dinámica morfodinámica observada. Durante este intervalo, las modificaciones en la geometría del cauce fueron mínimas, lo que sugirió una condición de estabilidad morfológica. El valor del factor morfológico es mínimo teniendo en cuenta que su incremento genera inestabilidades numéricas (Morgan *et al.*, 2020). Los resultados de las simulaciones, luego del ajuste inicial descrito, que definen el punto inicial real de nuestros escenarios se presentan en la Figura 4, donde se indican las secciones transversales de control que más adelante se analizarán para cada geometría en la margen intervenida (curva 1, C1) y la margen opuesta, localizada aguas abajo de la intervención (curva 2, C2).

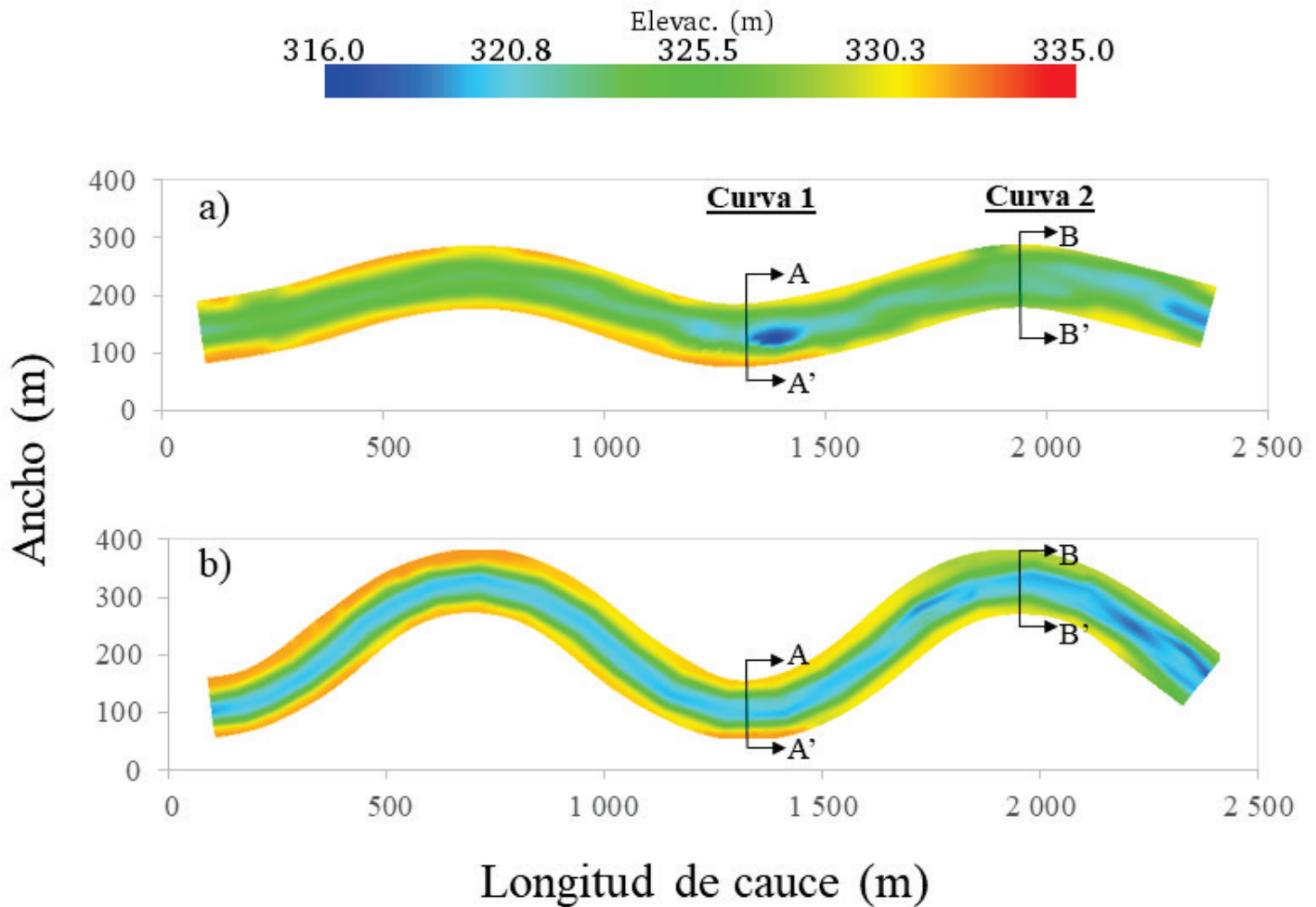


Figura 4. Desarrollo morfológico inicial de los cauces sintéticos: a) cauce curvatura baja y b) cauce curvatura media. Flujo de izquierda a derecha.

Los tipos de intervención que se consideran en este estudio son muros longitudinales y espigones con diferentes características, como longitud, inclinación y separación. Considerando que la longitud de los espigones se define en función del ancho del cauce (Chabokpour, 2024), se tomó entre el 15 y 30 % del ancho del canal (Akbari *et al.*, 2021). Las inclinaciones de los espigones se encuentran por lo general entre 45 y

135°, es decir, inclinadas hacia aguas abajo o hacia aguas arriba; las últimas son las que se utilizan con más frecuencia (Prasad *et al.*, 2016). De acuerdo con lo anterior, en este estudio se consideran dos inclinaciones: 45° hacia aguas arriba y 90° perpendicular al flujo. En la Tabla 6 se presentan los 11 escenarios definidos para cada curvatura considerada, para un total de 22 escenarios.

Tabla 6. Escenarios de modelación.

Núm. de escenario	Curvatura	Curva 1			Curva 2		
		Tipo de obra	Inclinación °	Longitud (m)	Tipo de obra	Inclinación °	Longitud (m)
1	Baja ($\theta_0 = 15$)	Sin	Sin	Sin	-	-	-
2		Espigón	45	0.15B	-	-	-
3		Espigón	45	0.30B	-	-	-
4		Espigón	90	0.15B	-	-	-
5		Espigón	90	0.30B	-	-	-
6		Muro	-	Lc	-	-	-
7		Espigón	45	0.15B	Espigón	45	0.15B
8		Espigón	45	0.30B	Espigón	45	0.30B
9		Espigón	90	0.15B	Espigón	90	0.15B
10		Espigón	90	0.30B	Espigón	90	0.30B
11		Muro	-	Lc	Muro	-	Lc
12	Media ($\theta_0 = 40$)	Sin	Sin	sin	-	-	-
13		Espigón	45	0.15B	-	-	-
14		Espigón	45	0.30B	-	-	-
15		Espigón	90	0.15B	-	-	-
16		Espigón	90	0.30B	-	-	-
17		Muro	-	Lc	-	-	-
18		Espigón	45	0.15B	Espigón	45	0.15B
19		Espigón	45	0.30B	Espigón	45	0.30B
20		Espigón	90	0.15B	Espigón	90	0.15B
21		Espigón	90	0.30B	Espigón	90	0.30B
22		Muro	-	Lc	Muro	-	Lc

θ_0 = amplitud angular máxima.

Lc = longitud de curva.

B = ancho de cauce (m).

Sin = sin intervención.

Parámetros de análisis

Los resultados numéricos de los escenarios planteados en la Tabla 6 se comparan teniendo en cuenta que las condiciones iniciales son iguales. Las condiciones iniciales hacen referencia al nivel del lecho (Figura 4) y a los parámetros utilizados en la construcción del modelo numérico. Para la evaluación de los resultados y comparación entre los escenarios planteados con las simulaciones numéricas se emplean las definiciones que se presentan en la Figura 5.

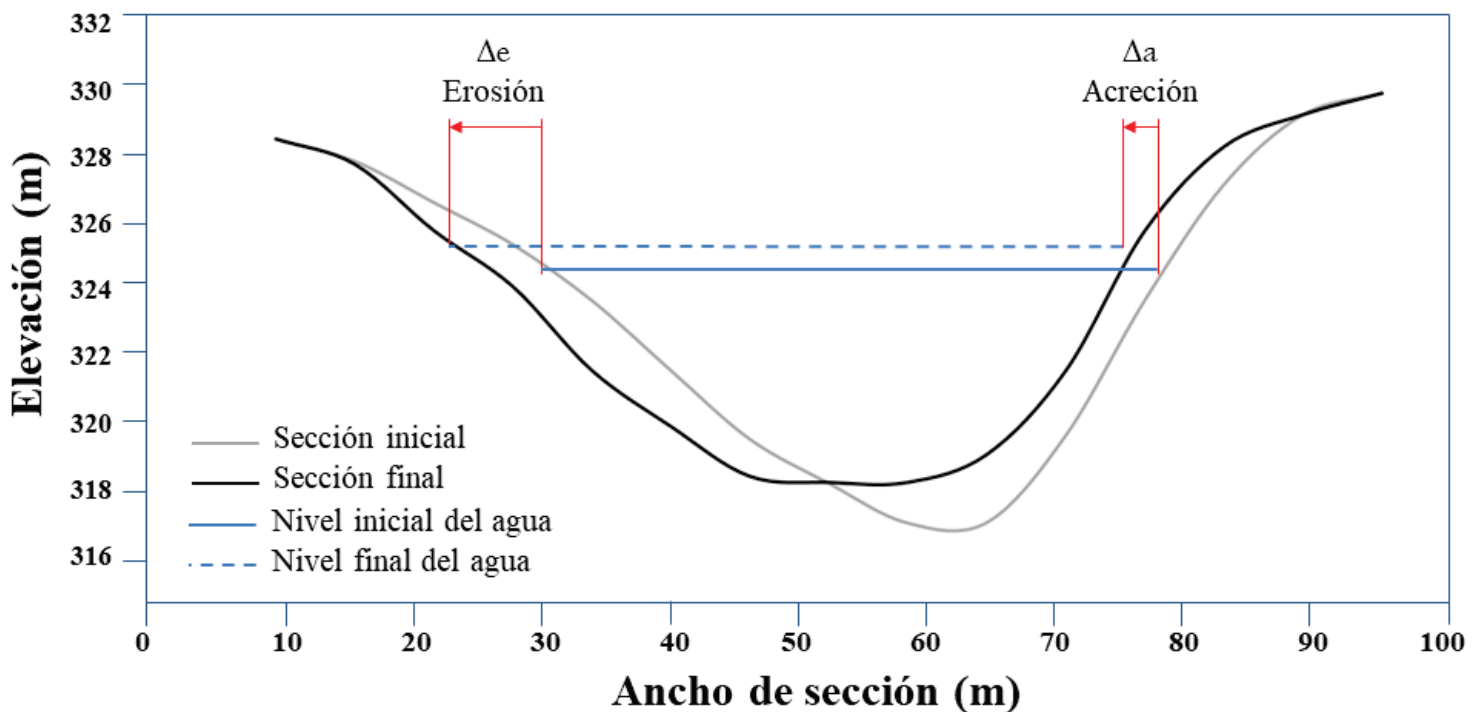


Figura 5. Esquema de medición de la erosión y acreción.

Estimadores de ajuste

Para la definición del coeficiente de rugosidad de Manning —utilizado como parámetro en la calibración hidrodinámica del modelo numérico— y para la definición de los parámetros morfodinámicos, se calculó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). El cálculo del NSE permitió identificar el valor óptimo del coeficiente de rugosidad y los parámetros morfodinámicos que mejor representan los resultados obtenidos en el canal experimental. A continuación se presenta la ecuación para el cálculo del coeficiente eficiencia:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_0^t - \bar{Q}_0)^2}$$

$\bar{Q}_0$ = media de los valores observados

Q_m^t = valores medidos o calculados

Q_0^t = valores observados

NSE = coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe

Resultados y discusión

De acuerdo con los resultados evidenciados en la Tabla 7, se seleccionó el modelo 3, el cual tiene el coeficiente de eficiencia Nash Sutcliffe más alto (0.782). El coeficiente de rugosidad utilizado en la etapa de calibración morfodinámica fue de 0.017.

Tabla 7. Resultados calibración hidrodinámica.

ID modelo morfodinámico	Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
1	0.118
2	0.623
3	0.782
4	0.519
5	0.592
6	0.606
7	0.565
8	0.654

Durante la fase de calibración morfodinámica, para el periodo de modelación entre las 9 y 11 horas, el coeficiente NSE óptimo se obtuvo con el modelo E; para el periodo de modelación entre las 86 y 88 horas, el coeficiente NSE óptimo correspondió al modelo F. Según la Tabla 8, los valores del NSE fueron 0.720 y 0.825, respectivamente.

Tabla 8. Resultados calibración morfodinámica.

ID modelo morfodinámico	Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)
A	0.716
B	0.716
C	0.716
D	0.716
E	0.720
F	0.676
G	0.679
H	0.536
A	0.823
B	0.824
C	0.824
D	0.824
E	0.824
F	0.825
G	0.819
H	0.802

La Figura 6 presenta los niveles del lecho del modelo experimental (Figura 6a), del modelo numérico (Figura 6b) y la diferencia entre los niveles del lecho de los modelos mencionados (Figura 6c). Los resultados observados en la Figura 6 corresponden al modelo F de la Tabla 8.

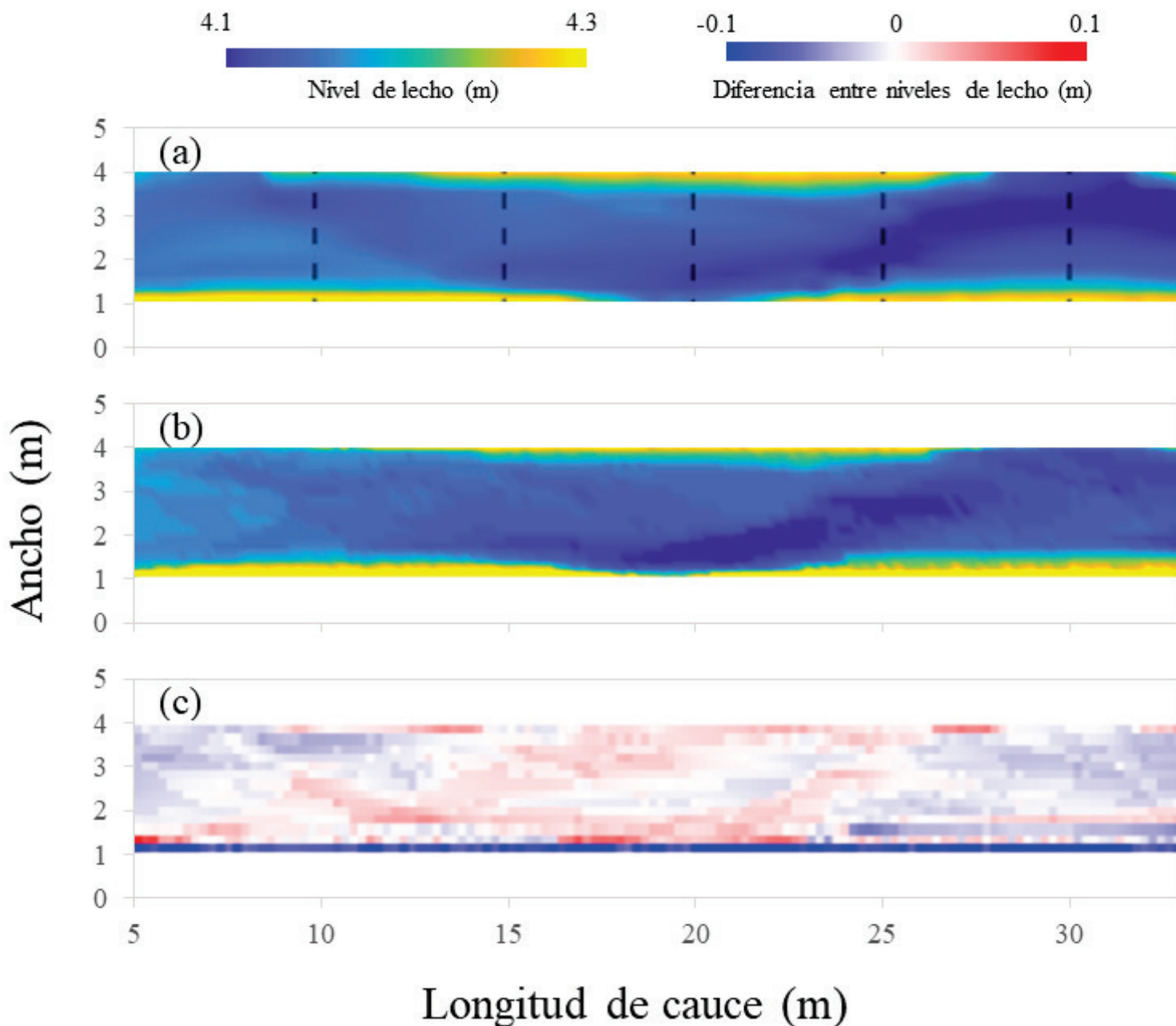


Figura 6. Configuración en planta del lecho móvil; periodo de modelación 86-88 (horas): a) datos de laboratorio, b) modelo numérico, c) diferencia de mapas.

En la Tabla 9 y la Figura 7 se presentan los resultados de los escenarios considerados en la Tabla 6. Con estos resultados se confirma que el grado de curvatura del cauce tiene una alta relevancia en la dinámica de márgenes en términos de erosión y acreción. En un cauce intervenido con obras de protección y que presenta baja curvatura, la dinámica en las márgenes es menor en comparación con un cauce con las mismas condiciones de intervención, pero con mayor curvatura.

Tabla 9. Resultados de modelación.

Núm. de escenario	Curva 1		Curva 2		Cambio en erosión C1 (%)	Cambio en erosión C2 (%)	Cambio en acreción C1 (%)	Cambio en acreción C2 (%)
	Δe (m)	Δa (m)	Δe (m)	Δa (m)				
1	2.5	-2	1	-0.5				
2	3	-2	2	-1	20	100	0	100
3	5.5	-3.5	0	0	120	-100	75	-100
4	0	-0.5	1	-0.5	-100	0	-75	0
5	5	-4	0.5	-0.5	100	-50	100	0
6	2.5	-2	0.5	-0.5	0	-50	0	0
7	-2	1	1	-0.5	-180	0	-150	0
8	2.5	1	0	0	0	-100	-150	-100
9	2.5	-2	1	-0.5	0	0	0	0
10	0.5	-0.5	1	-0.5	-80	0	-75	0
11	1	-0.5	0.5	-0.5	-60	-50	-75	0
12	4	-2	6	-3				
13	2	-1	2.5	-1	-50.0	-58.3	-50.0	-66.7
14	1	-0.5	2	-1	-75.0	-66.7	-75.0	-66.7
15	0.5	-0.5	2.5	-1	-87.5	-58.3	-75.0	-66.7
16	0	0	2	-1	-100.0	-66.7	-100.0	-66.7
17	1	-0.5	2	-1	-75.0	-66.7	-75.0	-66.7
18	1.5	-0.5	2	-1	-62.5	-66.7	-75.0	-66.7
19	0	0	0	0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0
20	-1	0.5	1.5	-0.5	-125.0	-75.0	-125.0	-83.3
21	-4	2	-1	0.5	-200.0	-116.7	-200.0	-116.7
22	0	0	2	-1	-100.0	-66.7	-100.0	-66.7

Δe = erosión.

Δa = acreción.

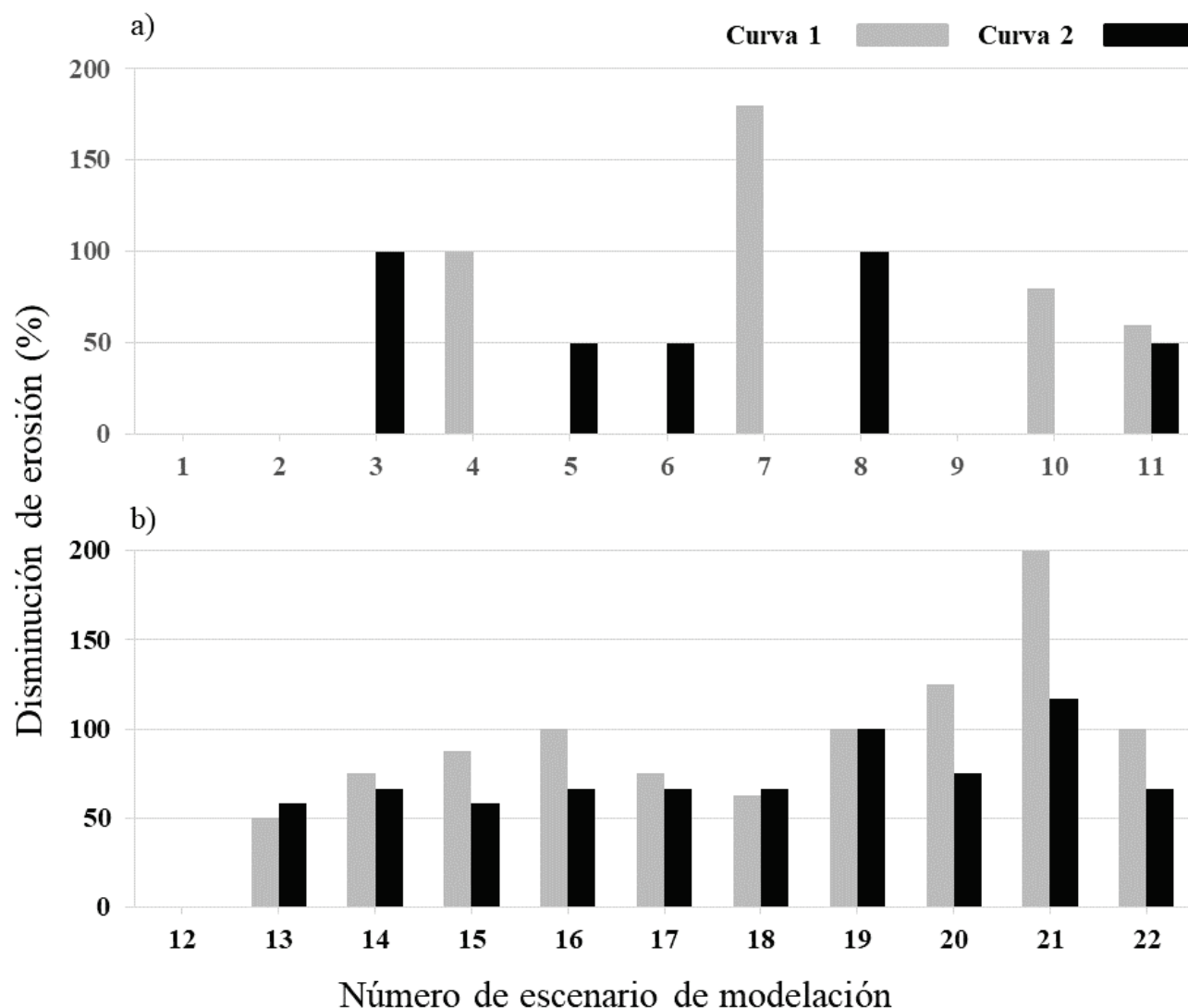


Figura 7. Porcentaje de disminución de la erosión: a) cauce curvatura baja, b) cauce curvatura media. La descripción de los escenarios se presenta en la Tabla 6.

Los resultados consignados en la Figura 7 evidencian la disminución de la erosión en las márgenes afectadas de las curvas C1 y C2 en todos los escenarios de modelación. Los escenarios correspondientes al cauce de curvatura baja (1 al 11) indican que no siempre existe disminución de la erosión en la margen protegida, observada en solo 4 de los 10

escenarios considerados. Además, puede evidenciarse que solo en el escenario 11 se presenta disminución de la erosión de forma simultánea en ambas márgenes, lo cual confirma que la efectividad del tipo de obra depende de la forma en planta del río (Figura 7). De hecho, en uno de los escenarios en los que solo se protege la margen afectada, se evidencia inclusive el incremento de la erosión en la margen opuesta. Sin embargo, la reducción de la erosión es notoria en la margen opuesta (C2), cuando se protegen ambas márgenes. Teniendo en cuenta tales consideraciones, el análisis de los escenarios realizados en los casos con curvatura baja es de menor interés para el objetivo de nuestro trabajo y, por este motivo, los análisis que se presentan en esta sección se enfocan en los escenarios del cauce de sinuosidad media (12 al 22).

En la Figura 7b se observa que el escenario 13 genera la menor disminución de erosión en la margen afectada (C1), en comparación con los demás escenarios (14 al 22); mientras que en la curva 2 (C2), la menor disminución de la erosión (espigón con $90^\circ - L = 3B$) en ambas márgenes se observa en dos escenarios (13 y 15). Por otra parte, con el escenario 21 se obtiene la mayor disminución de la erosión, reportando decrecimiento de 200 y 116.7 % para la margen afectada la margen opuesta (C2), respectivamente.

En los resultados de los escenarios en la curvatura media que plantean la protección con espigones de la margen afectada (13-16) evidencia que la longitud de estos elementos influye radicalmente en la respuesta de la curva protegida (C1): a mayor longitud del espigón mayor es la reducción de la erosión tanto en la curva protegida (C1) como en la curva opuesta (C2) (Tabla 9). Esta misma tendencia se observa cuando se protegen ambas márgenes, pero es evidente que la reducción en la erosión es mucho mayor cuando se protegen tanto la margen afectada

como la opuesta. Comparando los escenarios en los que solo se protege la curva afectada con espigones que tienen la misma longitud y diferente inclinación (13 y 15; 14 y 16), se observa que la disminución de la erosión es mayor en la margen protegida cuando se tiene la mayor inclinación (90°), obteniendo la misma respuesta en la margen opuesta. Haciendo el mismo análisis en los escenarios de protección de ambas márgenes (afectada y opuesta), con espigones que tienen la misma longitud y diferente inclinación (18 y 20; 19 y 21), una inclinación superior de los espigones genera mayores reducciones de la erosión en ambas márgenes (C1 y C2), siendo mucho más evidente el efecto en la margen protegida. La relación entre la longitud de los espigones y la respuesta morfológica del cauce también la observaron Zhang *et al.* (2020); sin embargo, se ha demostrado también que este tipo de resultados no se pueden generalizar, pues trabajos como los de Gissoni y Willi (2008) han demostrado que el efecto de los parámetros geométricos de las obras está muy relacionado con la configuración en planta del canal.

El efecto del ángulo de inclinación del espigón observado en nuestro estudio está alineado con lo descrito por Prasad *et al.* (2016). En este último estudio se observó también el incremento de la erosión de la margen opuesta a la zona protegida, lo cual valida lo observado en los resultados del escenario 12, donde la intervención de la margen protegida (C1) traslada e incrementa los procesos erosivos aguas abajo en la margen opuesta (C2).

En el escenario 17 (muro lateral en la curva 1), la disminución de la erosión es de 75 % y 66.7 en C1 y C2, respectivamente. Cuando se protegen las dos márgenes con muros laterales (escenario 22), la disminución de la erosión de la margen afectada aumenta en comparación con el escenario 17; mientras que la respuesta en la margen opuesta se

mantiene muy parecida. La Figura 8 presenta la comparación entre las secciones transversales en el momento inicial y el momento final de la modelación numérica tanto en la margen afectada como en la margen opuesta para escenarios seleccionados.

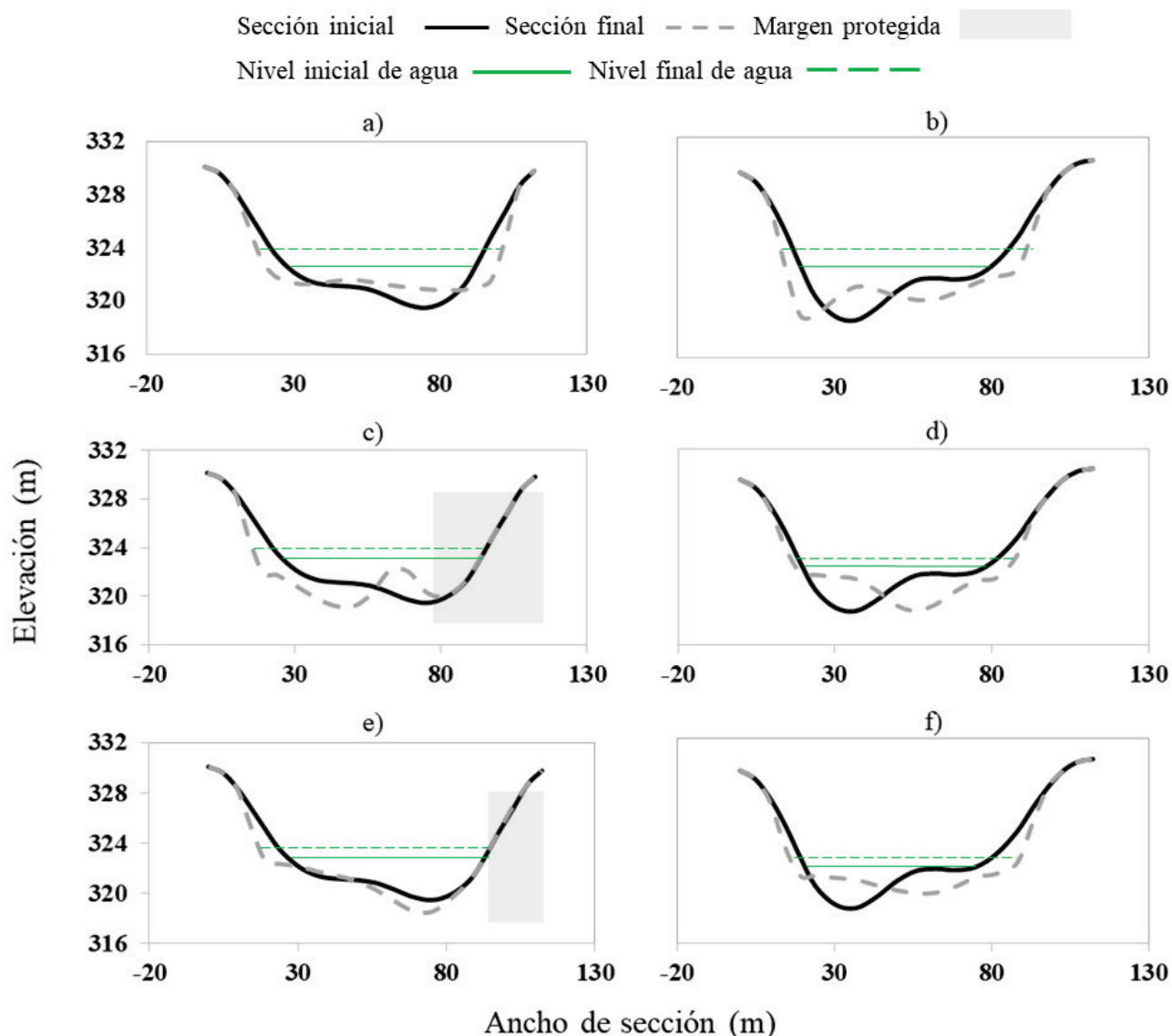
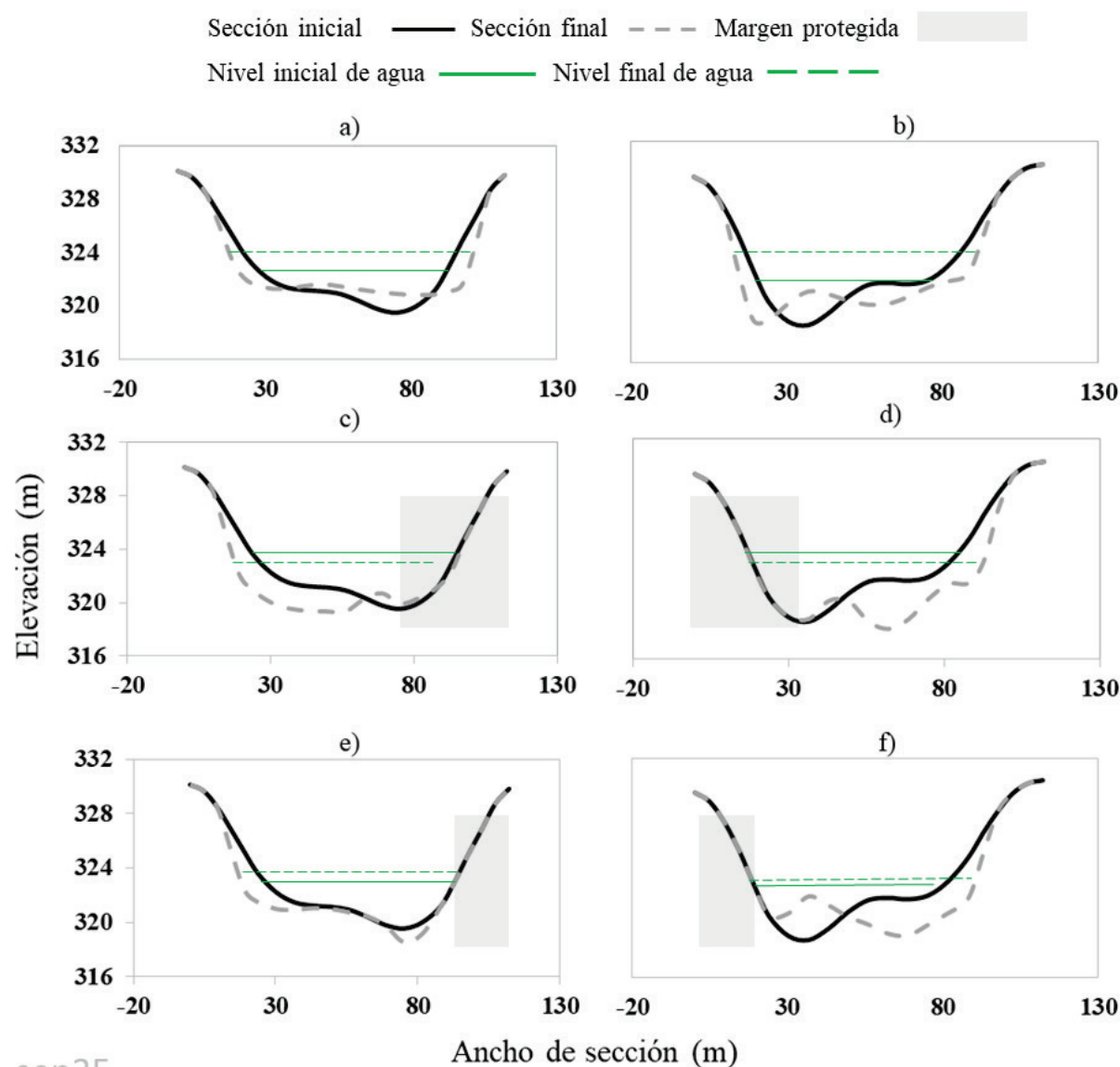


Figura 8. Secciones transversales (una margen protegida) del cauce de curvatura media en márgenes afectada (sección A-A') y opuesta (sección B-B'). Condiciones inicial y final para: a) sección A-A', escenario 12 (sin obras); b) sección B-B', escenario 12 (sin obras); c) sección A-A', escenario 16 (más efectivo); d) sección B-B', escenario 16 (más efectivo); e) sección A-A', escenario 13 (menos efectivo); f) sección B-B', escenario 13 (menos efectivo). La ubicación de las secciones se muestra en la Figura 4 y Figura 5.

La Figura 8 (c, d, f) presenta las secciones transversales obtenidas en los escenarios 16 y 13, respectivamente. En estos escenarios se protege solo la margen afectada, siendo el escenario 16 el más efectivo y el escenario 13 el que registra menor reducción en la erosión. El efecto significativo entre el mejor (16) y el peor (13) escenario que solo protegen la margen afectada (C1) se presenta en la erosión detectada en ambas curvas, pues la diferencia observada del proceso de acreción en las curvas afectada y opuesta es mínima. Teniendo en cuenta los escenarios en los que se considera la protección de ambas márgenes del cauce, la Figura 9 (c, d) muestra las secciones transversales del caso más efectivo (escenario 21) y la Figura 9 (e, f) las correspondientes al menos efectivo (escenario 18).



sep25

Figura 9. Secciones transversales (dos márgenes protegidas) del cauce de curvatura media en márgenes afectada (sección A-A') y opuesta (sección B-B'). Condiciones inicial y final para: a) sección A-A', escenario 12 (sin obras); b) sección B-B', escenario 12 (sin obras); c) sección A-A', escenario 21 (más efectivo); d) sección B-B', escenario 21 (más efectivo); e) sección A-A', escenario 18 (menos efectivo); f) sección B-B', escenario 18 (menos efectivo). La ubicación de las secciones se muestra en la Figura 4 y Figura 5.

En términos locales (secciones transversales), la diferencia de los resultados de los escenarios mencionados no es significativa, sin embargo, a nivel de tramo, los procesos de erosión en las dos curvas son representativos. Se observa algo similar cuando se protegen ambas márgenes en cuanto a procesos de acreción: la diferencia de los resultados no solo es importante entre los escenarios que protegen las dos curvas (18 y 21) sino también cuando se comparan los resultados con los escenarios que protegen una sola curva (13 y 16). En resumen, observando los resultados reflejados en las secciones transversales, es válido mencionar que la intervención de las márgenes controla los procesos de erosión en los puntos intervenidos, sin embargo, con las secciones transversales no se puede evidenciar la evolución de los procesos de acreción de márgenes intervenidas; para evidenciar los efectos de las obras de protección sobre las márgenes se requiere la vista en planta del cauce.

La Figura 10 presenta la profundidad del flujo en condiciones iniciales y finales para los escenarios que protegen solo la margen afectada (escenarios 13 y 16). En las figuras 10e y 10f se valida lo ya mencionado: a mayor longitud y mayor grado de inclinación, el resultado en cuanto al control de la dinámica de márgenes mejora notablemente. Lo anterior, teniendo en cuenta que en la Figura 10d, en la curva 1, se observa un proceso de erosión mayor que lo mostrado en la Figura 10f. Cuando se protege solo la margen afectada se evidencia el desarrollo de procesos locales que pueden generar fenómenos de socavación posteriores.

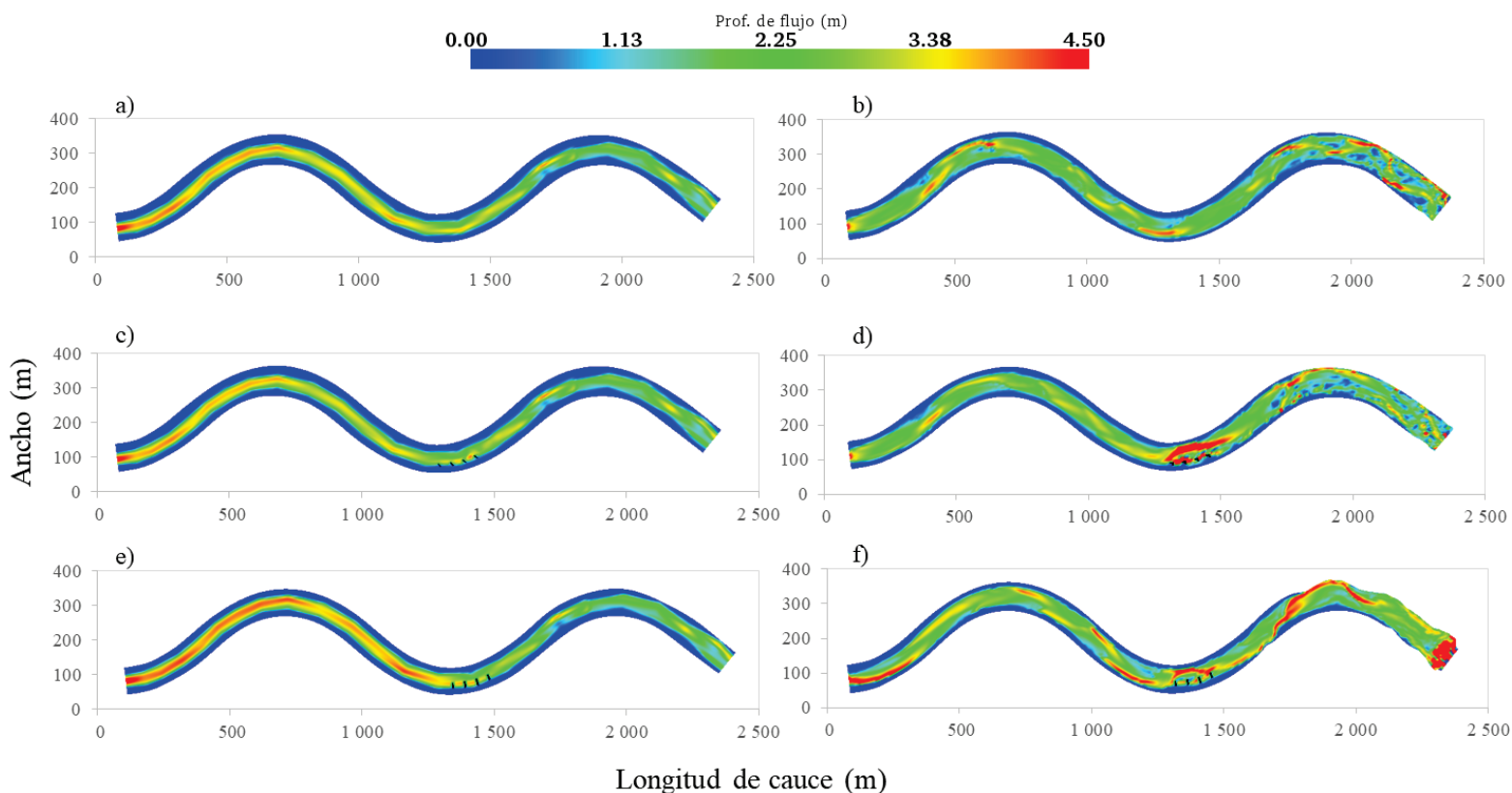


Figura 10. Comparación de la profundidad del flujo en el cauce de curvatura media cuando solo se protege la margen afectada. Condiciones inicial y final para: a) escenario 12 (inicial-sin obras); b) escenario 12 (final-sin obras); c) escenario 13 (inicial-menos efectivo); d) escenario 13 (final-menos efectivo); e) escenario 16 (inicial-más efectivo); f) escenario 16 (final-más efectivo). Flujo de izquierda a derecha.

En la Figura 11 se observa la profundidad de flujo cuando se protegen las dos márgenes del escenario 18 (11c y 11d) y escenario 21 (11e y 11f). A diferencia de lo evidenciado en la Figura 10, cuando se protegen las dos márgenes, se observa un control de la erosión a nivel de tramo (aguas abajo de la curva 1). En la Figura 11f se observa reducción

del lecho aguas abajo de la margen opuesta, en comparación con lo obtenido en la Figura 11e, por lo que se deduce que la intervención de esa zona desplaza los procesos identificados en las condiciones iniciales.

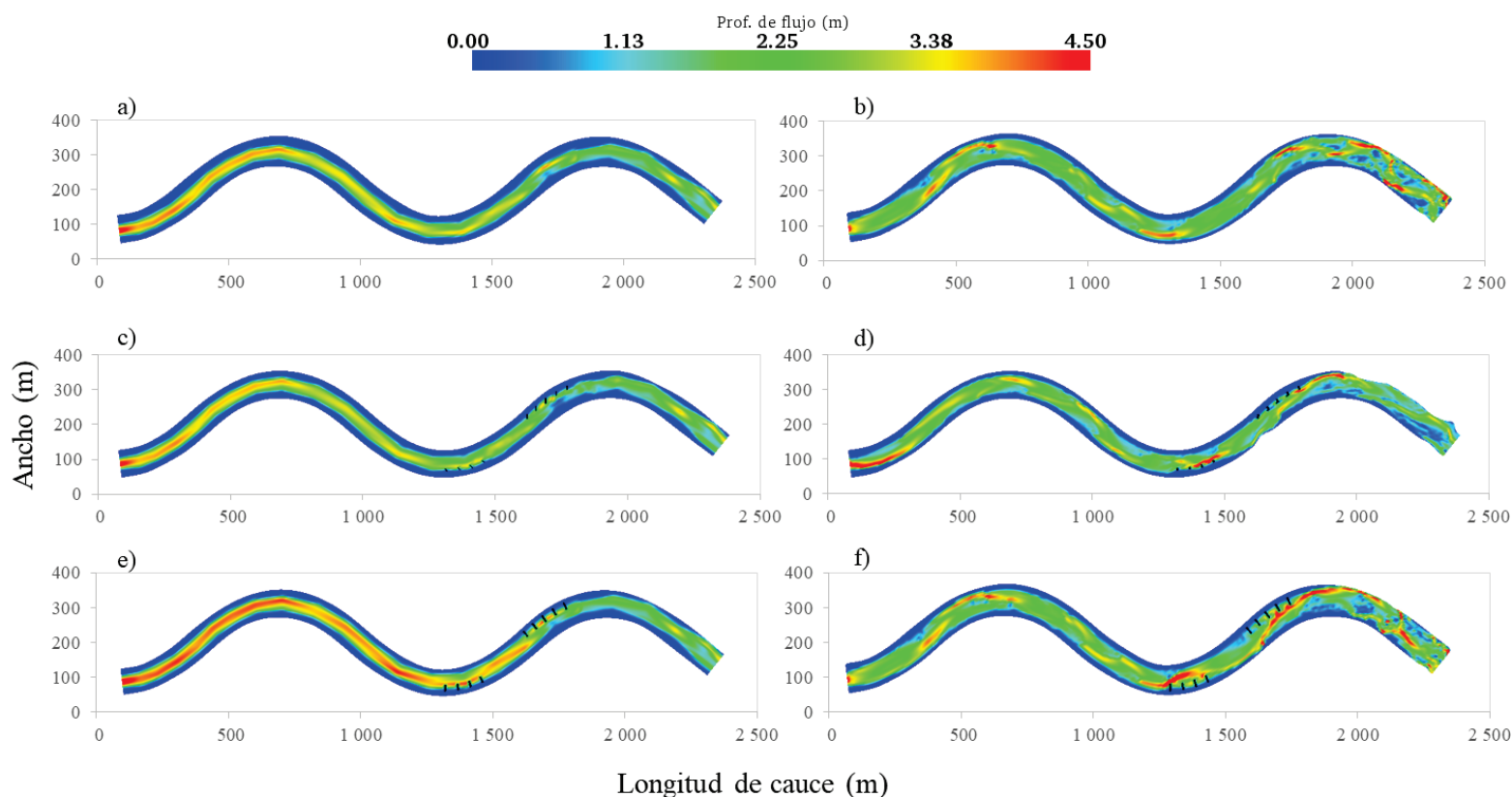


Figura 11. Comparación de la profundidad del flujo en el cauce de curvatura media cuando se protegen la margen afectada y la opuesta. Condiciones inicial y final para: a) escenario 12 (inicial-sin obras); b) escenario 12 (final-sin obras); c) escenario 18 (inicial-menos efectivo); d) escenario 18 (final-menos efectivo); e) escenario 21 (inicial-más efectivo); f) escenario 21 (final-más efectivo). Flujo de izquierda a derecha.

En la Figura 12 se presentan la profundidad del flujo y el número de Froude para los escenarios sin obras (12a y 12b); escenario más efectivo que protege solo C1, escenario 16 (12c y 12d); y el escenario más efectivo que protege ambas márgenes, escenario 21 (12e y 12f). Se evidencia que con la protección de ambas márgenes, la profundidad del flujo disminuye sustancialmente en las márgenes afectadas. En las figuras 12b, 12d y 12f se observa también una notable reducción del número de Froude en cercanías de las márgenes afectadas a lo largo del tramo de estudio. Es importante mencionar el incremento local del número de Froude al frente de los espigones propuestos en la margen opuesta del escenario 21 (Figura 12f).

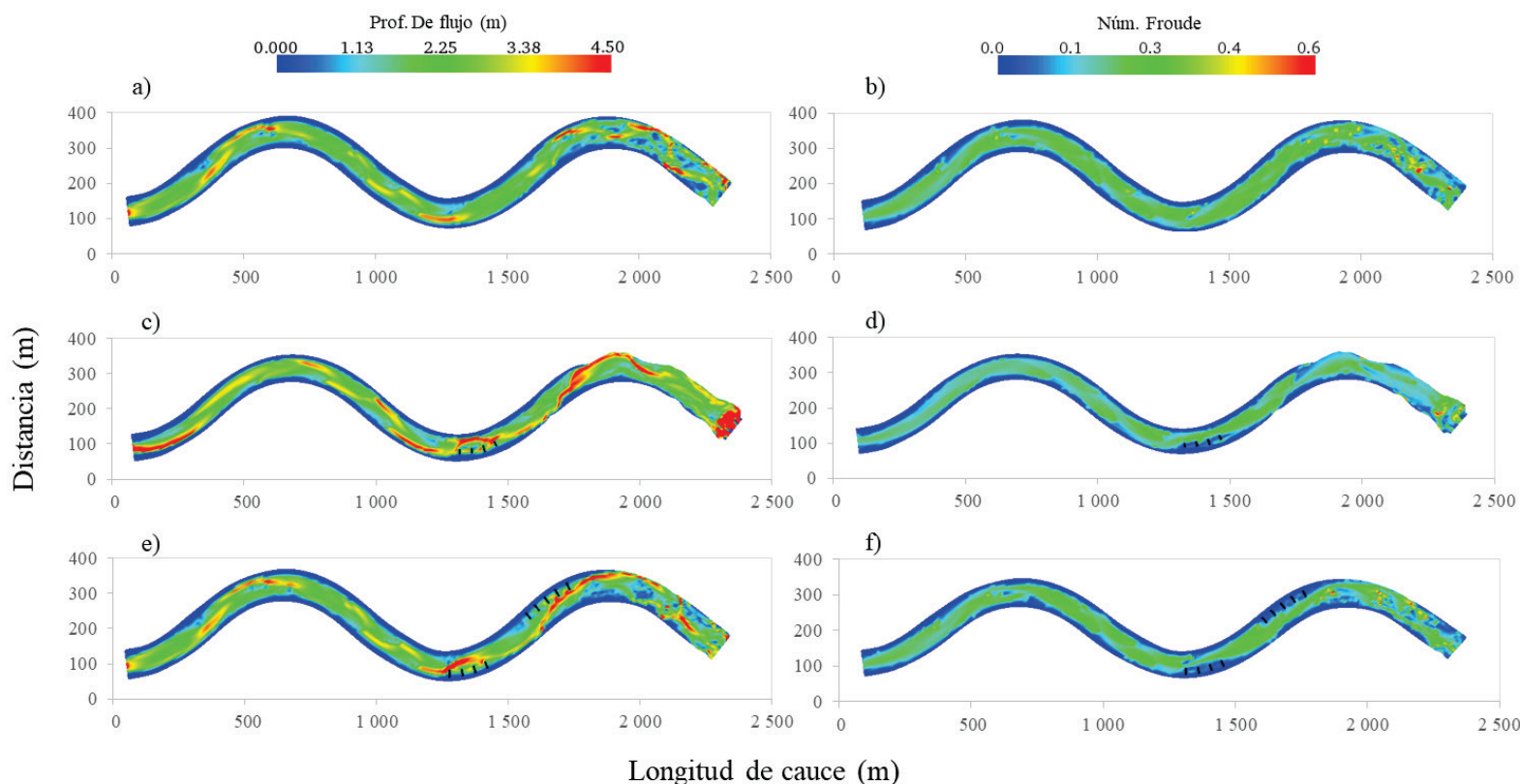


Figura 12. Comparación de la profundidad del flujo y el número de Froude en la condición final de los escenarios más efectivos: a) profundidad de flujo sin obras; b) número de Froude sin obras; c) profundidad de flujo, escenario 16; d) número de Froude, escenario 16; e) profundidad de flujo, escenario 21; f) número de Froude, escenario 21. Flujo de izquierda a derecha.

El comportamiento de la profundidad del flujo y la concentración de los vectores de velocidad en la zona central del canal observadas en nuestro trabajo (figuras 10 a 12) ratifican lo observado por Prasad *et al.* (2016), en donde el incremento de la velocidad y profundidad del flujo en el centro del canal se recomiendan para fines de navegabilidad.

En la Figura 13 se presentan detalles de algunas zonas de los escenarios analizados en las figuras 10 a 12, resaltando los vectores de velocidad. En las figuras 13b y 13c se observa el cambio en la dirección de los vectores de velocidad generado por las obras de intervención. Asimismo, se puede apreciar cómo los vectores se ajustan al pasar los espigones. Aunque las velocidades permanecen relativamente bajas, alrededor de 1.27 m/s, en los escenarios sin intervenciones (Figura 13a), se evidencia que los vectores de velocidad se orientan directamente hacia las márgenes de interés, lo que induce los procesos de erosión observados.

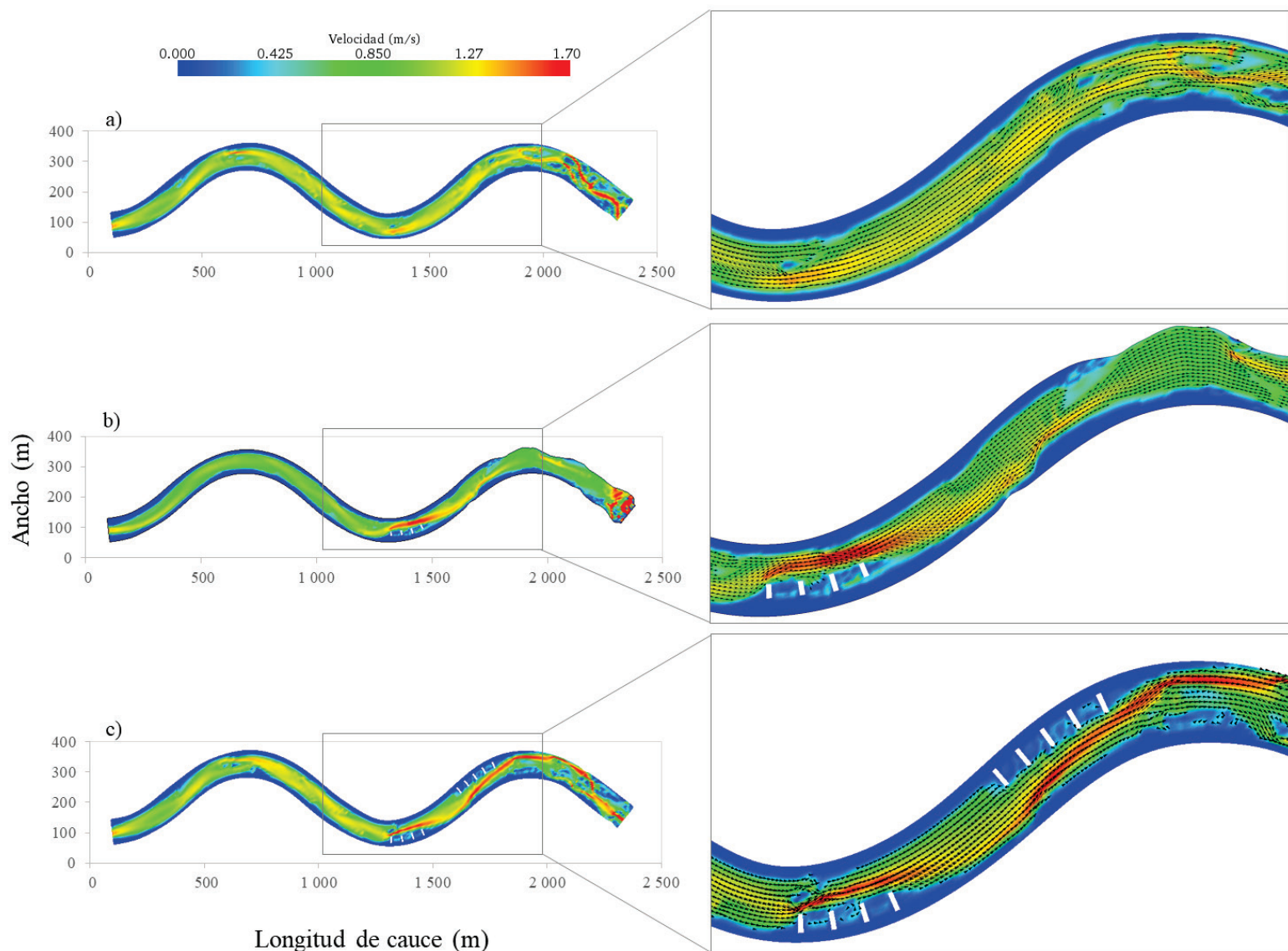


Figura 13. Magnitud y vectores de velocidad, en la condición final para: a) velocidad y vectores de velocidad sin obras; b) velocidad y vectores de velocidad, escenario 16; c) velocidad y vectores de velocidad, escenario 21. Flujo de izquierda a derecha.

La intervención mostrada en la Figura 13b contribuye de manera significativa a la reducción de la erosión en la margen intervenida; sin

embargo, esta figura enfatiza que los efectos erosivos se trasladan aguas abajo, afectando la margen opuesta. Además, se observa un incremento en la velocidad frente a la margen intervenida, fenómeno que podría modificar localmente la morfología del lecho del cauce. Con base en la distribución de los vectores de velocidad en la Figura 13c, se evidencia un aumento generalizado de la velocidad en el tramo de las márgenes intervenidas, con valores que oscilan entre 1.27 y 1.70 m/s. Estos valores se observan a lo largo de un tramo y no de manera puntual, lo que indica una alteración más uniforme en la dinámica de las márgenes intervenidas.

Conclusiones

Para observar y analizar la dinámica de las márgenes afectada y opuesta en un cauce intervenido con diferentes obras de protección, se realizaron modelaciones numéricas en dos dimensiones con un *software* de uso libre. Las simulaciones se realizaron con geometrías sintéticas considerando dos curvaturas: baja y media. Como obras de protección se incluyeron muros laterales y espigones con diferentes parámetros geométricos, interviniendo dos curvas del canal. Las obras de protección seleccionadas en este estudio reducen la erosión natural de las márgenes y confirman los hallazgos de estudios previos (Prasad *et al.*, 2016), demostrando que la reducción de los procesos de erosión y el aumento de los procesos de acreción están directamente relacionados con la geometría (longitud y orientación) de las obras de protección (espigones). Además, se identifica que la longitud del rezago espacial de la erosión hacia aguas abajo de la zona afectada depende de la configuración en planta del cauce, lo cual en nuestro estudio se refleja en las curvaturas consideradas.

Para las formas en planta consideradas, las mejores de obras de intervención se definen por espigones de longitud mínima equivalente al 30 % del ancho del cauce, con inclinaciones superiores a 90°. Sin embargo, nuestros resultados demuestran que en las aplicaciones prácticas es esencial considerar la implementación de diversos escenarios de intervención, adaptados a las características específicas de cada cauce, para asegurar la efectividad y durabilidad de las obras.

Nuestro estudio demuestra la necesidad de la evaluación de la respuesta morfológica que puede presentarse en la margen opuesta a una banca afectada por procesos erosivos debido al traslado de estos efectos hacia aguas abajo de la margen intervenida. Con las modelaciones realizadas se demuestra que considerar solo la protección y los efectos morfológicos de la margen afectada, sin considerar la margen opuesta y los sectores aguas abajo de la intervención puede incurrir en respuestas morfológicas indeseadas posteriores. Esto sugiere que los modelos hidrodinámicos empleados en los procesos de diseño deben cubrir una longitud considerable tanto hacia aguas arriba, para representar las condiciones del flujo de acceso, como hacia aguas abajo, para evaluar los posibles impactos de las obras propuestas en la morfología del tramo de río en estudio.

Los resultados obtenidos de los escenarios que consideran la protección de ambas márgenes evidencian, además de una reducción significativa de la erosión en la margen opuesta, cambios notables aguas arriba (zona afectada), en comparación con los resultados observados cuando solo se protege una margen. En los casos en los que ambas márgenes son protegidas con muros laterales, la respuesta morfológica del canal es similar a la observada en las intervenciones con espigones, dado que los principales cambios ocurren en la zona intervenida (la

margen afectada). No obstante, nuestros resultados también evidencian que la intervención mediante espigones es más eficiente en términos de control de la erosión en comparación con los muros laterales, lo que sugiere que los espigones son una opción más efectiva para mitigar los efectos negativos sobre la dinámica fluvial. Sin embargo, es importante resaltar que los espigones —o cualquier tipo de intervención que concentre radicalmente el flujo en la parte central del cauce— pueden generar una degradación importante del lecho del cauce a largo plazo, aspecto que también se recomienda se evalúe en los procesos de diseño de estas estructuras hidráulicas.

Aunque los espigones han demostrado ser efectivos para controlar la erosión local en determinadas áreas del cauce, se ha observado que su configuración (longitud, ángulo de inclinación y disposición espacial) influye en la redistribución de los flujos y en la migración de las bancas. Es necesario realizar investigaciones adicionales que consideren diferentes configuraciones geométricas de los espigones, así como su combinación con otras estructuras de protección (como diques o barreras transversales), a fin de identificar la disposición más eficiente para cada tipo de cauce.

Investigaciones futuras podrían enfocarse en el estudio de los tipos de cimentación (profunda, superficial, mixta) más eficientes para las estructuras hidráulicas analizadas y su resistencia ante eventos climáticos extremos, aspecto que no se ha abordado en el presente estudio. El trabajo futuro puede abordar también la integración de modelos morfodinámicos con enfoques ecológicos, desarrollando herramientas que permitan evaluar simultáneamente los efectos hidrosedimentológicos y ecológicos de la construcción de obras de protección. Por último, la incorporación de datos en tiempo real, como el uso de sensores remotos

y monitoreo permanente de los parámetros fluviales, permitirá una mayor precisión en la validación de los modelos y en la toma de decisiones para la gestión fluvial.

Referencias

- Abad, J. D., & García, M. H. (2005). Hydrodynamics in kinoshita-generated meandering bends: Importance for river-planform evolution. In: *Procedures, 4th IAHR Symp. on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, RCEM* (pp. 761-771). <https://doi.org/10.1201/9781439833896.ch83>
- Akbari, M., Vaghefi, M., & Chiew, Y.-M. (2021). Effect of T-shaped spur dike length on mean flow characteristics along a 180-degree sharp bend. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 69(1), 98-107. <https://doi.org/10.2478/johh-2020-0045>
- Beck, S. M. (1988). *Computer-simulated deformation of meandering river patterns* (Doctoral Thesis). Minneapolis-Saint Paul: University of Minnesota, USA. <https://www.proquest.com/openview/829892ff4a3eee2d2bd34e337a5ae777/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Bermúdez, J. (2013). Geometrías sintéticas en estudios morfodinámicos. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 4(1), 29-45.
- Brown, R., Pasternack, G., & Wallender, W. (2014). Synthetic river valleys: Creating prescribed topography for form-process inquiry and river rehabilitation design. *Geomorphology*, 214, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.025>

- Chabokpour, J. (2024). Numerical simulation of optimum groyne arrangement for preventing bank erosion (Case study of Ghezel-Ozan River. *Research Square*, 1-24. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4623183/v1>
- De Boer, D., Hassan, M., MacVicar, B., & Stone, M. (2005). Recent (1999-2003) Canadian research on contemporary processes of river erosion and sedimentation, and river mechanics. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(1), 265-283. <https://doi.org/10.1002/hyp.5767>
- Evangelista, S., Giovinco, G., & Kocaman, S. (2017). A multi-parameter calibration method for the numerical simulation of morphodynamic problems. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 65(2), 175-182. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0014>
- Ferguson, R. I. (2012). River channel slope, flow resistance, and gravel entrainment thresholds. *Water Resources Research*, 48(5). <https://doi.org/10.1029/2011WR010850>
- Gilbert, G. K. (1917). *Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada* (105 ed.). US Government Printing Office. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=D3TnAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA146&dq=Gilbert,+G.+K.+\(1917\).+Hydraulic-mining+debris+in+the+Sierra+Nevada.+US+Government+Printing+Office.+&ots=Ge7zxxnjpp&sig=t3ROHetBYXsAlZ9fAeurkcJ4y6k&redir_esc=y#v=](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=D3TnAAAAMAAJ&oi=fnd&pg=PA146&dq=Gilbert,+G.+K.+(1917).+Hydraulic-mining+debris+in+the+Sierra+Nevada.+US+Government+Printing+Office.+&ots=Ge7zxxnjpp&sig=t3ROHetBYXsAlZ9fAeurkcJ4y6k&redir_esc=y#v=)
- Gissoni, C., & Willi, H. (2008). Spur failure in river engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(2), 135-145. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:2(135))

- Gregory, K. J. (2006). The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79(3-4), 172-191. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.018>
- Güneralp, İ., Abad, J. D., Zolezzi, G., & Hooke, J. (2012). Advances and challenges in meandering channels research. *Geomorphology*, 163, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.011>
- Jianchun, H., Greimann, B. P., & Randle, T. J. (2014). Modelling of meander migration in an incised channel. *International Journal of Sediment Research*, 29(4), 441-453. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60058-5](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60058-5)
- Kinoshita, R. (1961). Investigation of channel deformation in Ishikari River. *Report of Bureau of Resources*, 174.
- Leopold, L. B., & Langbein, W. B. (1966). River meanders. *Scientific American*, 214(6), 60-73. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0666-60>
- Lesser, G. R., Roelvink, J., van Kester, J., & Stelling, G. (2007). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 883-915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Meade, R. H., & Moody, J. A. (2009). Causes for the decline of suspended-sediment discharge in the Mississippi River system. *Hydrological Processes*, 35-49. <https://doi.org/10.1002/hyp.7477>
- Morgan, J. A., Kumar, N., Horner-Devine, A. R., Ahrendt, S., Istanbuloglu, E., & Bandaragoda, C. (2020). The use of a morphological acceleration factor in the simulation of large-scale fluvial morphodynamics. *Geomorphology*, 356, 107088. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107088>

- Motta, D., Abad, J. D., Langendoen, E. J., & García, M. H. (2012). A simplified 2D model for meander migration with physically-based bank evolution. *Geomorphology*, 163, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.036>
- Nelson, J. M., Shimizu, Y., Abe, T., Asahi, K., Gamou, M., Inoue, T. *et al.* (2016). The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications. *Advances in Water Resources*, 93, 62-74. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.09.017>
- Oberkampf, W. L., Trucano, T. G., & Hirsch, C. (2004). Verification, validation, and predictive capability in computational engineering and physics. *Applied Mechanics Reviews*, 57(5), 345-384. <https://doi.org/10.1115/1.1767847>
- Overeem, I., Kettner, A., & Syvitski, J. (2013). 9.40 Impacts of humans on river fluxes and morphology. *Treatise of Geomorphology*, 9, 828-842. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00267-0>
- Parker, G., & Andrews, E. D. (1986). On the time development of meander bends. *Journal of Fluid Mechanics*, 162, 139-156. <https://doi.org/10.1017/S0022112086001970>
- Parker, G., Diplas, P., & Akiyama, J. (1983). Meander bends of high amplitude. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(10), 1323-1337. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1983\)109:10\(1323\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:10(1323))
- Prasad, S. K., Indulekha, K., & Balan, K. (2016). Analysis of groyne placement on minimising river bank erosion. *Procedia Technology*, 24, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.008>

- Rodriguez-Iturbe, I., & Rinaldo, A. (2001). *Fractal river basins: Chance and Self-Organization*. Cambridge University Press.
<https://hdl.handle.net/11577/3178351>
- Shoarinezhad, V., Wieprecht, S., & Haun, S. (2020). Comparison of local and global optimization methods for calibration of a 3D morphodynamic model of a curved channel. *Water*, 12(5), 1333.
<https://doi.org/10.3390/w12051333>
- Thomann, R. V. (1998). The future "golden age" of predictive models for surface water quality and ecosystem management. *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), 94-103.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1998\)124:2\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1998)124:2(94))
- Vargas-Luna, A., Duró, G., Crosato, A., & Uijttewaal, W. (2019). Morphological adaptation of river channels to vegetation establishment: A laboratory study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 124(7), 1981-1995.
<https://doi.org/10.1029/2018JF004878>
- Xu, D., & Bai, Y. (2013). Experimental study on the bed topography evolution in alluvial meandering rivers with various sinuousnesses. *Journal of Hydro-environment Research*, 7(2), 92-102.
<https://doi.org/10.1016/j.jher.2012.06.003>
- Yen, B. C. (1992). Dimensionally homogeneous Manning's formula. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(9), 1326-1332.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1992\)118:9\(1326\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1992)118:9(1326))
- Zhang, P., Yang, S., Hu, J., Li, W., Xuhui, F., & Li, D. (2020). A new method for extracting spanwise vortex from 2D particle image. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 68(3), 242-248.
<https://doi.org/10.2478/johh-2020-0020>