

# Evaluación de mini-espigones como contramedida para la reducción de socavación local en muros longitudinales de ríos con lecho granular usando Flow-3D y AHP

## Evaluation of Mini-Groynes as a Countermeasure for Reducing Local Scour in Longitudinal River Walls with Well-Graded Granular Beds Using Flow-3D and AHP

Ana Fernanda del Río-Puerta <sup>1a</sup>, Nelson Javier Cely-Calixto <sup>1b</sup>, Melquisedec Cortés-Zambrano <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación HYDROS, Maestría en Ingeniería de Recursos Hidráulicos, Facultad de Ingeniería, Universidad Francisco de Paula Santander, Colombia. Orcid: 0000-0001-9131-5400 <sup>a</sup>, 0000-0002-2083-6978 <sup>b</sup>.

Correos electrónicos: [anafernandap@ufps.edu.co](mailto:anafernandap@ufps.edu.co) <sup>a</sup>, [nelsonjaviercc@ufps.edu.co](mailto:nelsonjaviercc@ufps.edu.co) <sup>b</sup>.

<sup>2</sup> Grupo de investigación INVICA, Facultad en Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, Tunja, Colombia. Orcid: 0000-0002-6073-3391. Correo electrónico: [melquisedec.cortes@usantoto.edu.co](mailto:melquisedec.cortes@usantoto.edu.co)

Recibido: 12 febrero, 2024. Aceptado: 23 junio, 2024. Versión final: 30 julio, 2024.

### Resumen

El objetivo de la investigación es evaluar una contramedida para la reducción de la socavación local en muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado empleando el software Flow-3D, se selecciona la contramedida empleando el método multicriterio Analytic Hierarchy Process (AHP) y se modela numéricamente con pendientes de 2.5% y caudal de 1.68 m<sup>3</sup>/s. Mediante el método AHP se obtiene que la alternativa con mayor jerarquía son los mini-espigones, por lo cual se modelan escenarios de 0.3, 0.45 y 0.6 m de dimensión dispuestos en dirección y en contraflujo. La simulación en el software demostró que la contramedida de mini-espigones de 0.45 m de longitud dispuestos en contraflujo, presentaron una eficacia del 75 %, en comparación con los de 0.3 m y 0.6 m cuyas eficacias son 60.69 % y 51.12 % respectivamente. La investigación es un aporte significativo al planteamiento de alternativas de protección muros longitudinales.

**Palabras clave:** AHP; contramedida; eficacia; flow-3D; jerarquía; lecho granular; muros longitudinales; socavación local.

### Abstract

The objective of the research is to evaluate a countermeasure for the reduction of local scour in longitudinal walls in rivers with well-graded granular beds using the Flow-3D software; The countermeasure is selected using the Analytic Hierarchy Process AHP method and is numerically modeled with slopes of 2.5% and flow rates between 0.008 and

0.03 m<sup>3</sup>/s. Using the AHP method, it is obtained that the alternative with the highest hierarchy is the mini-breakwaters, for which scenarios of 0.3, 0.45, and 0.6 m in dimension are modeled, and arranged in the direction and counterflow. The simulation in the software showed that the countermeasure of mini-breakwaters of 0.45 m in length arranged in counterflow, presented an efficiency of 75%, compared to those of 0.3 m and 0.6 m whose efficiencies are 60.69 % and 51.12% respectively. The research is a significant contribution to the approach to alternatives for protecting longitudinal walls.

**Keywords:** AHP; countermeasures; efficiency; flow-3D; granular bed; hierarchy; local scour; longitudinal walls.

## 1. Introducción

La socavación constituye uno de los principales tipos de erosión hídrica, la cual actúa mediante el arrastre y excavación del material del lecho, lo que debilita las estructuras que protegen las riberas o márgenes de los ríos [1], [2], [3]. De la misma forma, la socavación actúa sobre las estructuras hidráulicas longitudinales de protección como los muros, ya que estos están expuestos al choque directo del flujo y, por ende, a la erosión y socavación por el flujo turbulento exponiendo sus bases y debilitándolas, generando así, fallas sobre las estructuras [4], [5].

Las condiciones típicas de ríos con lecho granular bien gradado se definen mediante coeficiente de uniformidad ( $C_u > 20$ ), el cual es estimado por la relación de diámetros  $d_{60}$  y  $d_{10}$ , siendo estos en los que el sedimento es igual o menor en peso a la muestra representativa, dado que se presenta una morfología dinámica causada por las erosiones y la deposición de sedimentos está relacionada con el caudal [6], [7]. A mayor profundidad de socavación, aumenta la inestabilidad de las estructuras como los muros de protección, quedando en peligro y generando daños y pérdidas económicas y ambientales [8], dentro de estas pérdidas se contempla principalmente la pérdida de terreno, modificación del cauce del río, modificación del talud, pérdidas económicas y en últimas instancias, vidas humanas [9].

En la socavación influyen diversos factores geomorfológicos y factores de transporte como: régimen de flujo, caudal, tamaño del sedimento, forma, ancho, pendiente de fondo, velocidad, geometría de sección transversal, entre otros [10], [11]. Los muros longitudinales mejoran la estabilidad de los taludes transversales del lecho y direccionan el flujo a un camino ondulado, por lo tanto, deben diseñarse con protección frente a la socavación [12]. Aun así, en el diseño e instalación de los muros longitudinales se presenta el problema de la capacidad de estimar la profundidad máxima de socavación a lo largo de la base de los muros longitudinales [12].

La existencia de diversas alternativas o métodos para evaluar la socavación como las investigaciones de

Maynord [13] y Mussetter [14], han predispuerto una serie de ecuaciones y recomendaciones para estimar la socavación máxima en cauces, pero no han sido suficientes para asegurar una estructura libre de fallas por socavación. En vista de esto, surge la necesidad de analizar, diseñar e implementar estructuras que funcionen para la protección de estructuras longitudinales como los muros, por lo cual, las contramedidas de socavación surgen como una estructura de control, las cuales sirven de apoyo para reducir, mitigar y controlar la socavación [15].

En vista de esto, diversos autores han analizado estructuras como contramedida de socavación y las han clasificado en dos grupos, de alteración del flujo y de blindaje. Las primeras funcionan como medio de desvío del flujo, con el fin de alejar la estructura del choque directo y, por ende, de la acción erosiva de los vórtices del flujo; por otra parte, las contramedidas de blindaje funcionan como cubierta del lecho, evitando la erosión y arrastre del sedimento por acción del flujo, reduciendo de esta forma, la socavación incluso en sedimentos con diámetro medio inferior a 1 mm [16], [17].

Por otra parte, el estudio del fenómeno de socavación se ha visto obstaculizado en términos de infraestructura, así como de condiciones de entorno, lo cual ha impedido su análisis en todos los entornos del campo, en vista de esto, se han presentado barreras técnicas y tecnológicas que impiden su adecuada investigación. En los últimos años surgen los modelos numéricos tridimensionales como alternativas para mejorar la predicción de la socavación, los cuales evalúan la exactitud del modelo físico, a través de la ciencia de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [18], [19], [20], [21], entre ellos hay diversos modelos donde se estudia el campo de flujo tridimensional, para predecir la socavación en modelos combinados de flujo de agua y transporte de sedimentos, como el caso del programa Flow-3D, que es una herramienta para investigación usada en diferentes ramas de la ciencia e investigación, este además, permite modelar tridimensionalmente numerosos escenarios de flujo, sedimento y estructuras, tales como muros longitudinales y contramedidas [22].

En vista de lo anterior, se hace necesario el estudio del comportamiento hidrodinámico del flujo y su acción erosiva, por lo cual, la investigación tiene como objetivo evaluar una contramedida para la reducción de la socavación local en muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado en un modelo tridimensional, mediante el software Flow 3D, en esta se analizan cuatro tipos de contramedida de alteración del flujo mediante el método de análisis jerárquico (AHP), con el fin de determinar la contramedida con mayor influencia y jerarquía para las condiciones analizadas en la investigación, para luego ser analizada en el Flow-3D y finalmente, determinar la eficacia de esta, en términos de reducción de la socavación.

## 2. Metodología

La investigación es de tipo aplicada – experimental, en las cuales se correlacionan datos obtenidos en investigaciones previas, con el fin de validar y calibrar el modelo numérico y de esta forma, abarcar un mayor escenario tanto geométrico, como hidráulico. Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a la selección de alternativas de contramedidas, tomando como referencia, el grupo de contramedidas de alteración del flujo; de esta forma, mediante información primaria obtenida por profesionales de la región, se toman en consideración 4 tipos de estructuras, siendo estas: Pilas de sacrificio, Paletas sumergidas, Espigones sumergidos y Nervaduras verticales, todas analizadas previamente por profesionales del campo de la ingeniería hidráulica.

### 2.1. Análisis multicriterio

Con base a lo anterior, se procede a realizar el análisis multicriterio, empleando el método Analytic Hierarchy Process (AHP), el cual facilita de asignación de pesos, determinando así, un resultado de importancia jerárquica con base a criterios seleccionados y su relación pareada entre ellos [23]. De acuerdo a esto, para el desarrollo del método se determinan 4 criterios como principales aportes al desarrollo de alternativas de solución a la problemática de diseño y construcción de estructuras o contramedida; de la misma forma, de cada uno de estos criterios, se toma como base 2 subcriterios, con el fin de relacionar la importancia e impacto que estos generan sobre los demás criterios y subcriterios [24], [25]. Se determina que esta metodología es acorde al objetivo de la investigación, ya que permite tener en cuenta múltiples aspectos, tales como el ambiental, comercial, económico y de implementación de la estructura, y con esto, determinar un tipo de contramedida que abarque en mayor medida cada uno de estos.

Seguido a esto, se determina el valor Lambda con los valores determinados de la matriz de ponderación inicial, empleando la Ecuación 1.

$$\lambda_{max} = \sum \lambda w \quad (1)$$

$\lambda_{max}$ : el valor máximo permitido para la matriz inicial  
 $\lambda$ : el vector de priorización de la matriz pareada  
 $w$ : suma producto de la matriz estándar

Luego se estima el Índice de Consistencia (IC) de las matrices obtenidas, este se efectúa mediante la Ecuación 2.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{(n - 1)} \quad (2)$$

Siendo n el número de subcriterios analizados, para el caso, tenemos 8.

$\lambda_{max}$ , es el valor obtenido aplicando la Ecuación 2.

Como tercer paso, se obtiene la relación de consistencia (CR) mediante la Ecuación 3.

$$CR = \frac{CI}{IA} \quad (3)$$

Siendo CI el índice de consistencia e IA el índice de aleatoriedad, tomado con base al número de subcriterios y dispuesto por Saaty.

### 2.2. Validación/Calibración del modelo numérico

Luego de implementar el análisis multicriterio se procede a la validación y calibración del modelo numérico en el cual se evalúa la contramedida seleccionada previamente. Para esto, se toman como base los resultados presentados por Cely et al., [26], en la que se desarrolla modelación experimental y se contrastan resultados físicos con el modelo numérico para su validación y calibración. De esta forma, se calibran resultados en un nuevo modelo tridimensional tomando como referencia de calibración, las profundidades de socavación obtenidas en el muro longitudinal izquierdo sin la disposición de la estructura de control o contramedida; con base a esto, se realiza la calibración del modelo en el Flow-3D para la evaluación de la contramedida seleccionada anteriormente.

### 2.3. Estimación de la eficacia de la contramedida

Luego de la validación y calibración del modelo con resultados de socavación, se dispone de la contramedida

seleccionada previamente, en este caso, se plantean 6 escenarios, entre los cuales se tienen en cuenta las dimensiones, la separación, el ángulo de inclinación y la orientación en la disposición de la contramedida, con el fin de plantear escenarios que representen mayor relevancia en términos de reducción de la socavación y con esto, se presente una alternativa viable de protección de estructuras longitudinales de las riberas de ríos. Con base a las socavaciones obtenidas, se estima la eficacia de los escenarios de la contramedida, para lo cual se dispone de la Ecuación 4, empleada por investigadores como Kardan et al., [27], Gaudio et al., [28] y Shafai et al., [29] para la estimación de la eficacia de estructuras de protección y contramedidas de socavación.

$$r = \left( \frac{H_{max} - H_c}{H_{max}} \right) * 100 \quad (4)$$

Siendo  $r$  la eficacia de la contramedida,  $H_{max}$  la profundidad máxima de socavación presentada sin la contramedida y  $H_c$  la profundidad de socavación medida luego de la disposición de la contramedida.

### 3. Resultados

#### 3.1. Selección de la contramedida por el método AHP

Este método toma en consideración criterios tales como ambientales, comerciales, económicos y de implementación, con los cuales se puede mejorar el análisis de viabilidad de estructuras con base al entorno en el que van a ser dispuestas. Esto facilita tomar

decisiones, mediante la importancia de los criterios con las alternativas, tomando en cuenta el pensamiento lógico en el análisis; de esta forma, se sigue una serie de pasos en los que se incluye:

- Identificación de la problemática.
- Búsqueda de aspectos de importancia.
- Análisis de alternativas.
- Asignación de jerarquía de criterios de selección.

#### 3.1.1. Disposición del método AHP

De acuerdo a lo anterior, se procede a la búsqueda de alternativas de contramedida, la cual se desarrolla mediante información primaria de profesionales; seguido a esto, se analizan los aspectos fundamentales que tienen impacto sobre cada una de las alternativas de estructura, estos se denominan criterios, para luego determinar dos subcriterios con base a cada uno de los tomados en cuenta anteriormente. Luego, se procede al cruce de información entre criterios, subcriterios y alternativas de contramedida, de la cual surge la relación pareada entre cada alternativa con respecto a los factores de importancia. En la Figura 1 se observa la estructura jerárquica entre criterios, subcriterios y alternativas de contramedida analizadas.

#### 3.1.2. Determinación de pesos e importancia

Con base en lo anterior, se definen o asignan los respectivos pesos o importancias de los criterios y subcriterios con base en los demás, para lo cual, se toma como referencia la tabla dispuesta por Saaty [30].

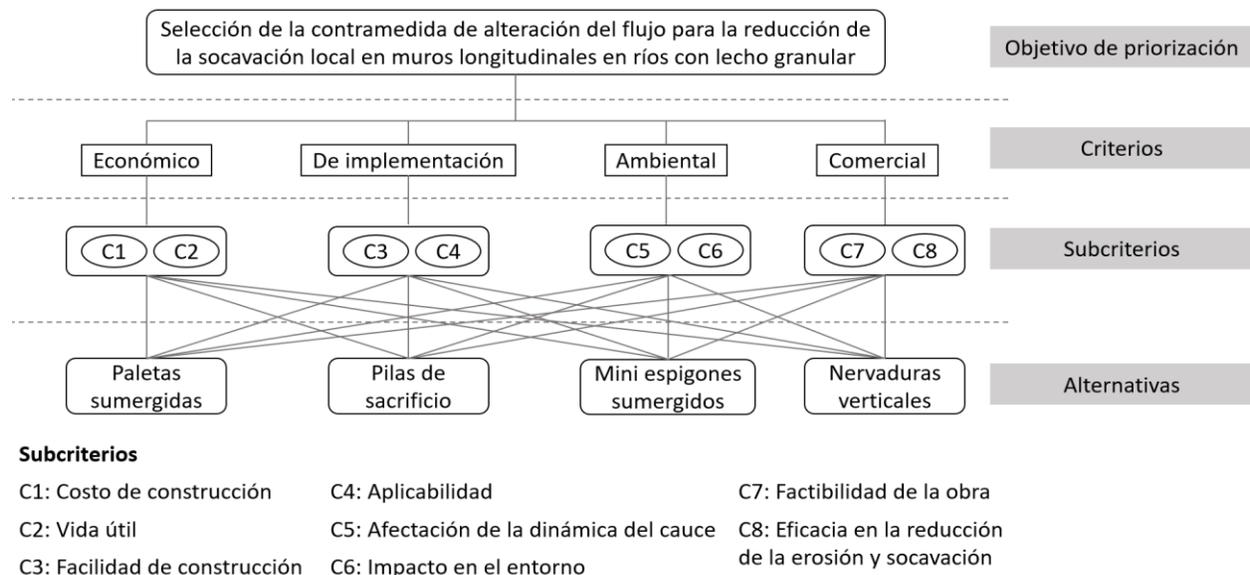


Figura 1. Estructura jerárquica

En [30] en esta se disponen rangos y criterios para la asignación de pesos e importancia; de acuerdo a esto, se obtiene una matriz pareada en la que se valora la importancia de los criterios, si se sobre ponen o no con respecto a otro criterio. En este sentido, se asignan valores numéricos entre 1 y 9, los cuales se dan en función a la importancia que cada criterio tiene con respecto al par analizado, tal como se dispone en la tabla de relaciones de importancia, presentada por Saaty, [30].

Es así, como mediante la revisión de aspectos, así como del entorno en los cuales son aplicadas las alternativas propuestas, se definen valores con los cuales se designa la matriz inicial, en la cual se hacen comparaciones entre criterios con base al peso o importancia que estos tienen sobre los demás, asignando un valor “x” y en su opuesto, un valor determinado como 1/x [31]. Con base a lo anterior, así como mediante el apoyo con información primaria obtenida de profesionales de la región, con respecto al diseño e implementación de contramedidas de socavación, se obtiene la matriz pareada de los subcriterios que se tienen en cuenta para el análisis multicriterio, tal como se presenta en la **Tabla 1**.

### 3.1.3. Normalización y prueba de consistencia de la matriz

Luego de la determinación de pesos de la matriz mediante la comparación de importancia de los subcriterios, se identifica el vector de normalización de

los pesos asignados con respecto al promedio de estos, con lo cual se crea la segunda matriz, correspondiente a la normalización de los pesos de los subcriterios, con respecto al promedio de estos y con la que obtenemos el vector de prioridades. En la **Tabla 2** se presenta la matriz normalizada.

Seguido a esto, tomando como referencia la **Tabla 2**, se estima el promedio estándar por filas de cada uno de los subcriterios planteados anteriormente, con lo cual se obtiene la ponderación de los subcriterios o vector de priorización. De esta forma, en la **Tabla 3** se presentan los vectores de priorización con respecto a los subcriterios analizados.

Tabla 3. Vector de prioridades

	Ponderación	%
Sc1	0.052	5.2%
Sc2	0.071	7.1%
Sc3	0.09	9.0%
Sc4	0.142	14.2%
Sc5	0.171	17.1%
Sc6	0.14	14.0%
Sc7	0.123	12.3%
Sc8	0.211	21.1%

Tabla 1. Matriz pareada de subcriterios

	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8
Sc1	1.00	0.33	0.50	0.33	0.50	0.50	0.33	0.33
Sc2	3.00	1.00	0.33	0.33	0.33	1.00	0.50	0.33
Sc3	2.00	3.00	1.00	0.50	0.33	0.50	1.00	0.50
Sc4	3.00	3.00	2.00	1.00	0.50	1.00	2.00	0.50
Sc5	2.00	3.00	3.00	2.00	1.00	1.00	0.50	1.00
Sc6	2.00	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	3.00	0.50
Sc7	3.00	2.00	1.00	0.50	2.00	0.33	1.00	0.33
Sc8	3.00	3.00	2.00	2.00	1.00	2.00	3.00	1.00

Tabla 2. Matriz estándar de los subcriterios

	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8
Sc1	0.05	0.02	0.04	0.04	0.08	0.07	0.03	0.07
Sc2	0.16	0.06	0.03	0.04	0.05	0.14	0.04	0.07
Sc3	0.11	0.18	0.08	0.07	0.05	0.07	0.09	0.11
Sc4	0.16	0.18	0.17	0.13	0.08	0.14	0.18	0.11
Sc5	0.11	0.18	0.25	0.26	0.15	0.14	0.04	0.22
Sc6	0.11	0.06	0.17	0.13	0.15	0.14	0.26	0.11
Sc7	0.16	0.12	0.08	0.07	0.30	0.05	0.09	0.07
Sc8	0.16	0.18	0.17	0.26	0.15	0.27	0.26	0.22

Con base a lo presentado en la **Tabla 3**, así como los resultados de la **Tabla 2**, se obtiene la prueba de consistencia lógica del método con base a los criterios y subcriterios, esta se calculó mediante la Ecuación 1 y con el cual se obtuvo un valor lambda de 8.83.

Seguido a esto, se efectúa el cálculo del índice de consistencia de la matriz, teniendo en cuenta el resultado de la lambda máxima obtenido anteriormente, para esto aplicamos la Ecuación 2, con la que obtenemos un índice de consistencia de 0.1, en la que se observa que la matriz es de consistencia admisible.

Finalmente, calculamos la relación de consistencia de la matriz, para lo cual tomamos como referencia la tabla dispuesta por Saaty [30], en la cual facilita una serie de índices de aleatoriedad (IA) de acuerdo al número de subcriterios, para nuestro caso, este índice es de 1.41, ya que tenemos en cuenta 8 subcriterios. Mediante la Ecuación 4 se calcula la relación de consistencia de la matriz, en la que se obtiene un CR de 0.07.

De acuerdo a esto, se considera que la matriz es aceptable, ya que la relación de consistencia es de 7 %, por lo cual no es necesario realizar reformulación de la matriz de pesos inicial. De acuerdo a lo anterior, así como lo obtenido mediante el vector de priorización, se formula la **Tabla 4** siendo la matriz de ponderación final de la alternativa.

De acuerdo a la **Tabla 4**, la alternativa que mejor se ajusta a los criterios y subcriterios analizados, es la contramedida compuesta por mini espigones sumergidos, por lo cual, esta es dispuesta para evaluación en el modelo numérico tridimensional.

### 3.2. Validación y calibración del modelo

Tal como se menciona, se toman como referencia los resultados de modelación experimental presentados por Cely et al., [26], con los cuales se comparan resultados experimentales y numéricos obtenidos en el Flow-3D. Se dispone de doble mallado y obteniendo un tamaño de malla general de 0.06 m y una segunda malla para la zona del lecho y la contramedida de 0.03 m, con esto se da

cumplimiento a la relación de mallado 2:1 para la optimización del modelo. De acuerdo a lo anterior, en la **Figura 2** se observan los resultados de calibración del modelo tridimensional.

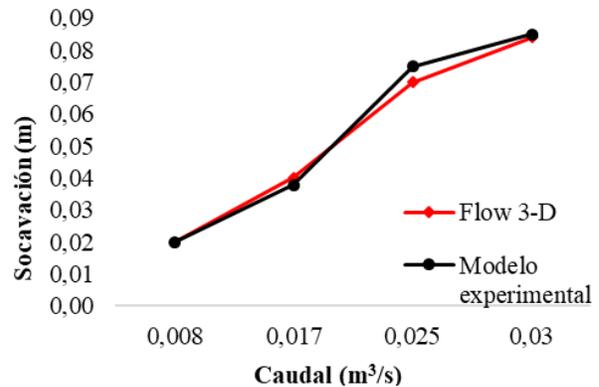


Figura 2. Calibración del modelo. Caudal vs Socavación  
Fuente: Cely et al., [26].

Luego de la selección de espigones como contramedida de alteración del flujo y de la validación y calibración del modelo tridimensional presentado en la **Figura 2**, se obtuvieron los escenarios de la contramedida, los cuales fueron analizados como estructura de control y reducción de la socavación, para esto, se dispusieron seis escenarios de longitud de los mini espigones, tomando como referencia que los la estructura de control no supere el 50% del ancho total del canal dispuesto, con el fin de no generar un estrechamiento del mismo y, por ende, aumenten las velocidades del flujo en el modelo numérico. En este se evalúan las dimensiones, separación y disposición en el canal, manteniendo en cada uno de estos, una inclinación de 70°, tal como se presenta en la **Figura 3**.

### 3.3. Estimación de la eficacia de la contramedida

Seguido a esto, con las profundidades de socavación presentadas antes y después de la implementación de cada uno de los escenarios de mini espigones sumergidos como contramedida de socavación, se estima mediante la aplicación de la Ecuación 4, la eficacia presentada por cada uno de los escenarios dispuestos.

Tabla 4. Matriz final de ponderación de alternativas

	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5	Sc6	Sc7	Sc8	Priorización	%
Paletas Sumergidas	0.195	0.283	0.208	0.234	0.208	0.184	0.431	0.086	0.213	21.3%
Pilas De Sacrificio	0.183	0.217	0.097	0.390	0.287	0.163	0.103	0.382	0.255	25.5%
Mini Espigones Sumergidos	0.542	0.418	0.204	0.234	0.406	0.367	0.199	0.432	0.346	34.6%
Nervaduras Verticales	0.077	0.081	0.489	0.140	0.098	0.284	0.265	0.099	0.185	18.5%
Ponderación	0.052	0.077	0.097	0.146	0.180	0.135	0.107	0.203	0.999	100%

De esta forma, en la **Figura 4** se presentan las eficacias obtenidas en cada uno de los escenarios de mini espigones evaluados en el modelo numérico tridimensional.

Tal como se observa en la **Figura 4**, el escenario de contramedida de alteración del flujo que presenta mayor eficacia es el de 0.45 m de longitud, dispuesto en contra flujo, esto concuerda con lo presentado por Cely et al., en [32], en los que se analiza el comportamiento del flujo y su reducción bajo condiciones de lecho granular en un modelo experimental, y en el que se obtuvo una mayor eficacia en los escenarios de disposición en contra flujo. Así mismo, se observa una tendencia a presentar baja eficacia en los escenarios de mayor longitud, esto debido a la ocupación en exceso del ancho del canal dispuesto, lo cual genera un estrechamiento del flujo y, por ende,

mayores velocidades del mismo, lo que finalmente se presenta como mayores profundidades de socavación a lo largo del lecho.

#### 4. Conclusiones

Mediante el método de análisis multicriterio AHP, se analizaron 4 criterios y 8 subcriterios fundamentales para la selección de la contramedida de socavación, obteniendo una razón de consistencia de 0.07, reflejando una matriz de consistencia admisible, con lo cual se obtiene que la contramedida de mini espigones para los criterios evaluados, presenta mayor relación con las condiciones analizadas en la investigación.

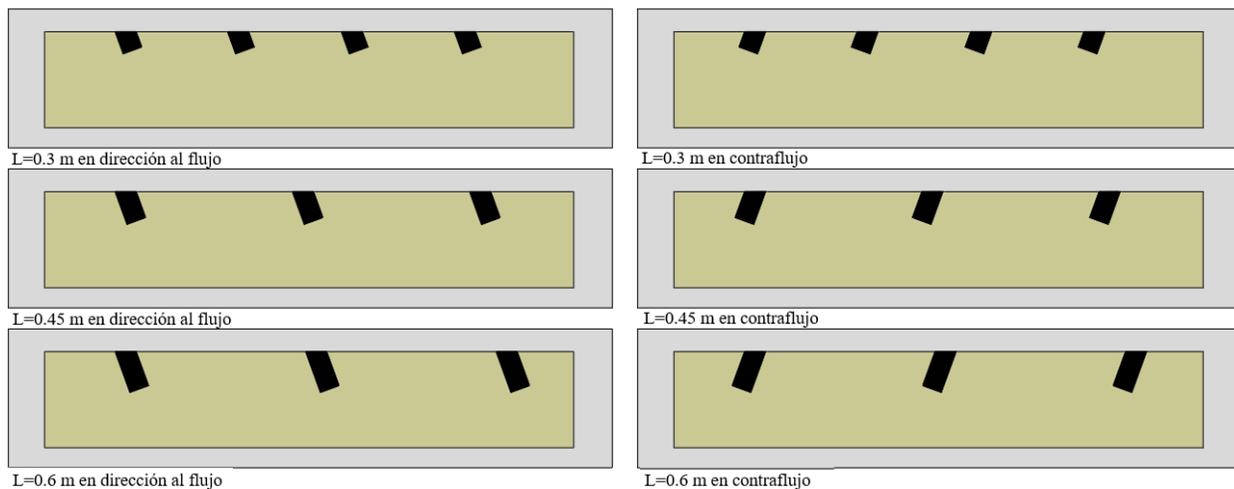


Figura 3. Escenarios de evaluados de la contramedida.

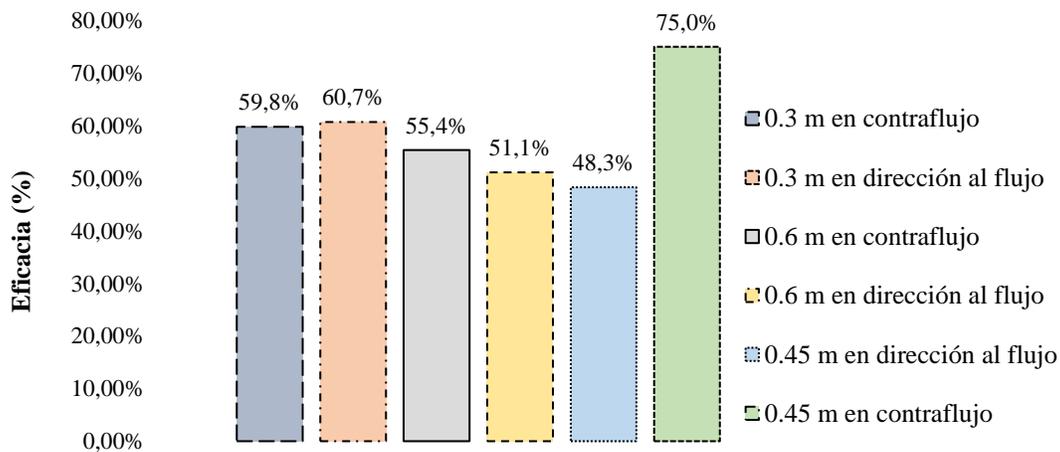


Figura 4. Eficacia de los escenarios de mini espigones sumergidos.

De la misma forma, luego de la selección de la contramedida mediante el método AHP, y su análisis en el software Flow-3D, se observa que presenta un 75 % de eficacia en la reducción de la socavación presentada para el escenario de dimensión de los mini espigones de 0.45 m de longitud, dispuestos en contraflujo en el canal, siendo estos los que alejan en mayor medida los vórtices formadores de socavación a lo largo del lecho.

## 5. Recomendaciones

Se recomienda analizar la alternativa de espigones en el modelo tridimensional a una escala aumentada, con la finalidad de evaluar su funcionamiento hidráulico.

## Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad Francisco de Paula Santander por el acompañamiento y el apoyo técnico en el proyecto, así como a la Universidad Santo Tomás, por el apoyo técnico y tecnológico.

## Financiación

Esta investigación se desarrolla con apoyo tecnológico de la Universidad Santo Tomás sede Tunja para el acceso al software Flow-3D. El desarrollo de la investigación se desarrolla sin apoyo económico.

## Contribución de los autores

A. del Río-Puerta: Recolección y análisis de datos, redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Redacción – documento final. N. Cely-Calixto: Metodología, Investigación, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición, Redacción – documento final. M. Cortés-Zambrano: Conceptualización, Análisis formal, Metodología, Redacción – borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión actual del documento.

## Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

## Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

## Declaración de consentimiento informado

No aplica.

## Referencias

- [1] G. Yan et al., “Recognition of Fluvial Bank Erosion Along the Main Stream of the Yangtze River,” *Engineering*, vol. 19, pp. 50–61, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.027>
- [2] M. Sohrabi, A. Keshavarzi, M. Javan, “Impact of bed sill shapes on scour protection in river bed and banks,” *International Journal of River Basin Management*, vol. 17, no. 3, pp. 277–287, Jul. 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/15715124.2018.1498855>
- [3] A. R. Shahriar, A. C. Ortiz, B. M. Montoya, M. A. Gabr, “Bridge Pier Scour: An overview of factors affecting the phenomenon and comparative evaluation of selected models,” *Transportation Geotechnics*, vol. 28, p. 100549, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100549>
- [4] B. Le, “Training rivers with longitudinal walls long-term morphological responses,” *Geboren te Quang Nam*, 2018, doi: <https://doi.org/10.4233/uuid:cf588b41-0bcc-490f-9cf0-ea0d95a92678>
- [5] J. Toapaxi, L. Galiano, M. Castro, X. Hidalgo, and N. Valencia, “Análisis de la socavación en cauces naturales,” *Revista Politécnica*, vol. 35, no. 3, 2015.
- [6] P. M. Biron, C. Robson, M. F. Lapointe, and S. J. Gaskin, “Three-dimensional flow dynamics around deflectors,” *River Res Appl*, vol. 21, no. 9, pp. 961–975, Nov. 2005, doi: <https://doi.org/10.1002/rra.852>
- [7] J. C. Príncipe, “Evaluación de los puentes con socavación ubicados en la provincia de Yungay - Ancash,” Universidad San Pedro, Huaraz, 2018.
- [8] N. Taha, M. M. El-Feky, A. A. El-Saiad, I. Fathy, “Numerical investigation of scour characteristics downstream of blocked culverts,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 5, pp. 3503–3513, Oct. 01, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.05.032>
- [9] S. W. Coronación, “Evaluación de impactos por la extracción de agregados para la construcción en el cauce del río Achamayo, Concepción - Junín,” Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, 2017.

- [10] E. E. Cañas, “Estudio de la socavación local en pilas circulares de puentes en lechos no cohesivos con modelación física en laboratorio,” Bogotá, 2018.
- [11] S. Barbosa, “Metodología para calcular la profundidad de socavación general en ríos de montaña (lecho de gravas),” Universidad Nacional, Medellín, 2013.
- [12] A. Khosronejad, P. Diplas, D. Angelidis, Z. Zhang, N. Heydari, F. Sotiropoulos, “Scour depth prediction at the base of longitudinal walls: a combined experimental, numerical, and field study,” *Environmental Fluid Mechanics*, vol. 20, no. 2, pp. 459–478, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/s10652-019-09704-x>
- [13] S. Maynard, “Toe-Scour Estimation in Stabilized Bendways,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, no. 8, pp. 460–464, Aug. 1996, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1996\)122:8\(460\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1996)122:8(460))
- [14] Mussetter Engineering Inc., “Sediment and erosion design guide,” 2008.
- [15] Z. Tang et al., “Countermeasures for local scour at offshore wind turbine monopile foundations: A review,” *Water Science and Engineering*, vol. 15, no. 1, pp. 15–28, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.12.010>
- [16] A. Fathi, S. M. A. Zomorodian, “Effect of Submerged Vanes on Scour Around a Bridge Abutment,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 7, pp. 2281–2289, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1453-5>
- [17] A. Radice and V. Davari, “Roughening Elements as Abutment Scour Countermeasures,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 140, no. 8, p. 06014014, Aug. 2014, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000892](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000892)
- [18] A. Bayon, D. Valero, R. García-Bartual, F. José Vallés-Morán, P. A. López-Jiménez, “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump,” *Environmental Modelling & Software*, vol. 80, pp. 322–335, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.018>
- [19] T. Fischer-Antze, N. Rütger, N. R. B. Olsen, D. Gutknecht, “Three-dimensional (3D) modeling of non-uniform sediment transport in a channel bend with unsteady flow,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 47, no. 5, pp. 670–675, 2009, doi: <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3252>
- [20] N. R. B. Olsen, H. M. Kjellesvig, “Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of maximum local scour depth,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 36, no. 4, pp. 579–590, Jul. 1998, doi: <https://doi.org/10.1080/00221689809498610>
- [21] I. S. Pereira, H. D. Leitao, M. C. Fael, “Flow-3D Modelling of the Debris Effect on Maximum Scour Hole Depth at Bridge Piers,” in *38th IAHR World Congress - Water: Connecting the World*, The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2019, pp. 2813–2821, doi: <https://doi.org/10.3850/38wc092019-1850>
- [22] H. Pourshahbaz, S. Abbasi, P. Taghvaei, “Numerical scour modeling around parallel spur dikes in FLOW-3D,” *Drink Water Eng Sci*, pp. 1–16, 2017, doi: <https://doi.org/10.5194/dwes-2017-21>
- [23] H. Y. Chona-Jurado, N. J. Cely-Calixto, and G. A. Carrillo-Soto, “Comparación obras de reducción del riesgo sobre áreas de amenaza alta por inundación sobre un sector de la Quebrada Tonchala en San José de Cúcuta,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 22, no. 3, Sep. 2023, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023012>
- [24] P. Mesa, J. Martín-Ortega, J. Berbel, “Análisis multicriterio de preferencias sociales en gestión hídrica bajo la Directiva Marco del Agua Multicriteria analysis of water management under the Water Framework Directive,” *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 2008, doi: <https://doi.org/10.22004/ag.econ.57236>
- [25] D. Smith, C. A. Graciano Gallego, M. Martínez, “Análisis multi-criterio para evaluar la capacidad de absorción de energía de tubos fabricados con láminas de metal expandido y sólidas,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 1, pp. 69–80, 2018, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018007>

[26] N. C. Calixto, M. C. Zambrano, A. G. Castaño, G. C. Soto, “Analysis of a three-dimensional numerical modeling approach for predicting scour processes in longitudinal walls of granular bedding rivers,” *EUREKA, Physics and Engineering*, vol. 2023, no. 4, pp. 168–179, 2023, doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002682>

[27] N. Kardan, Y. Hassanzadeh, H. Hakimzadeh, “The effect of combined countermeasures on main local scouring parameters using physical models,” *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 10, no. 23, 2017, doi: <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3304-6>

[28] R. Gaudio, A. Tafarojnoruz, F. Calomino, “Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 50, no. 1, pp. 35–43, 2012, doi: <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.649548>

[29] M. Shafai, K. Khademi, H. Kozeymehnezhad, “Submerged vane-attached to the abutment as scour countermeasure,” *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 775–783, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.02.006>

[30] T. L. Saaty, *Toma de decisiones para líderes*. Rws Publications, 2014.

[31] F. Muñoz-Sarria, M. Bueno-López, “Metodología para la selección de tecnologías en proyectos de energización rural,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 21, no. 3, 2022, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v21n3-2022008>

[32] L. G. Castillo, J. T. García, J. M. Carrillo, “VII Jornadas de Ingeniería del Agua,” in *La resiliencia de las infraestructuras hidráulicas frente al cambio climático*, Cartagena, 2023, pp. 1–726.