

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Estimación del diámetro del enrocado para protección de la base de muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado

Estimation of the diameter of the rip-rap for protection of the base of longitudinal walls in rivers with well-graded granular bed

Cómo citar: Cely-Calixto, N., Galvis-Castaño, A., Carrillo-Soto, G.A. Estimación del diámetro del enrocado para protección de la base de muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado. Ingeniería y Competitividad. 25(4), e- 20213114. doi: 10.25100/iyc.v25i4.13114

N. J. Cely-Calixto^{1,2,§}, A. Galvis-Castaño² G. A. Carrillo-Soto³.

¹Universidad del valle, Cali, Colombia

²Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia

§nelson.cely@correounivalle.edu.co; alberto.galvis@correounivalle.

Resumen

En la hidráulica fluvial, la turbulencia y velocidad del flujo representan un gran desafío en la implementación de estructuras de protección de las riberas, debido al arrastre de material y deterioro que se genera sobre estas estructuras. La investigación tiene por objetivo estimar el diámetro óptimo de roca para disposición del enrocado (rip-rap) como medida de protección contra la socavación en muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado. El estudio se desarrolla mediante modelación física en un canal hidráulico fabricado en acrílico, variando las condiciones de pendiente entre 1 y 2.5 % y caudales entre 0.017 y 0.030 m³/s midiendo la velocidad de flujo y la capacidad de arrastre de rocas calizas con diámetros de ¾", 1", 1¼", 1½". Asimismo, se validan las ecuaciones de la división de carreteras de California, de Maynard, del departamento de transporte de EE.UU, del servicio geológico de EE.UU y de R.A Leopardo. El desarrollo de la investigación demuestra que la ecuación de Maynard se ajusta más a las condiciones experimentales, en la cual para velocidades superiores a 0.8 m/s los diámetros arrastrados son de ¾" y 1", y que la ecuación del servicio geológico de EE.UU establece el diámetro más pequeño del enrocado, colocando en riesgo la estabilidad y eficacia del enrocado como estructura de protección. La investigación representa un aporte significativo al desarrollo de obras hidráulicas, ya que establece diámetros de disposición de enrocado, en función a la velocidad de arrastre de material del flujo.

Palabras claves: Arrastre de material, Lecho granular, Modelación física, Muros longitudinales, Rip-rap.

Abstract

In river hydraulics, turbulence and flow speed represent a great challenge in the implementation of riverbank protection structures, due to the dragging of material and deterioration that is generated on these structures. The objective of the research is to estimate the optimal diameter of rock for the disposal of rock filling (rip-rap) as a protection measure against scour in longitudinal walls in rivers with well-graded granular beds. The study is carried out through physical modeling in a hydraulic channel made of acrylic, varying the slope conditions between 1 and 2.5% and flows between 0.017 and 0.030 m³/s, measuring the flow velocity and the drag capacity of limestone rocks with diameters of ¾", 1", 1¼", 1½". Likewise, the equations of the California Division of Highways, Maynard, the US Department of Transportation, the US Geological Survey, and R.A. Leopardo are validated. The development of the investigation shows that the Maynard equation is more adjusted to the experimental conditions, in which for speeds greater than 0.8 m/s the dragged diameters are ¾" and 1", and that the equation of the geological service of EE.UU establishes the smallest diameter of rip-rap, jeopardizing the stability and effectiveness of rip-rap as a protective structure. The research represents a significant contribution to the development of hydraulic works, since it establishes the diameters of the rockfill arrangement, depending on the speed of dragging material from the flow.

Keywords: Granular bed, Longitudinal walls, Material drag, Physical modeling, Rip-rap.





Introducción

De acuerdo a lo publicado por UNESCO, (2002), un gran número de los desastres naturales que se presentan están relacionados con el agua, es decir, cerca del 50% aproximadamente corresponden a inundaciones, y el número de eventos ha aumentado en áreas urbanas, generando alteraciones sociales y ambientales negativas (1). A mediados del siglo XIX surgió en California la idea de establecer presas que estuvieran formadas por fragmentos de roca de distintos tamaños, con el fin de asegurar una estabilidad para mitigar la fuerza con la cual la velocidad del flujo arrastra el material (2). Actualmente, los profesionales de obras civiles desarrollan adaptaciones que tengan como resultado garantizar el cumplimiento de las normas de obras de protección para establecer su eficacia, debido a los cambios generados en las condiciones del entorno, producto del cambio climático (3). Una de estas medidas de protección es el establecimiento de estructuras longitudinales como los muros, los cuales se instalan en las riberas de los ríos o dentro del cauce con la implementación de contramedidas (4). Estas estructuras permiten la protección de sectores aledaños al cauce del río, de crecidas o desbordamientos, ya que permiten el control del flujo contra inundaciones (5). No obstante, por su ubicación en la ribera del río, y la acción erosiva del flujo, estas estructuras se vuelven susceptibles ante el proceso de desgaste y socavación, lo cual denota la necesidad de establecer contramedidas, con el fin de disponer una estructura eficaz y duradera para la protección contra inundaciones (6).

Una de las problemáticas que más generan impactos negativos en las poblaciones aledañas a cauces, es la socavación en la base de los muros longitudinales, esta se presenta como la reducción general del fondo, causada por un mayor arrastre de sedimentos (6). Los enrocados o rip-rap son estructuras que se realizan para proteger los taludes contra daños causados por la erosión del agua, este se instala mediante asentamientos de roca con el fin de disipar la energía de choque del flujo (7,8). Para comprender el criterio con el cual se diseña y construye una obra de protección de estructuras longitudinales, se debe mantener un equilibrio entre el tipo de obra y el control que esta genera sobre la erosión en su entorno superficial; de esta forma, mediante la implementación de estudios preliminares de los proyectos civiles, se estiman profundidades de socavación y se determina el grado de empotramiento del muro, así como también, de la profundidad de disposición de la contramedida, esto con el fin de minimizar las alteraciones del cauce del río sobre las poblaciones (9,10). Estas estructuras hidráulicas se diseñan según sus características, como el tramo del río en el cual se sitúa, estructura del flujo y el tipo de erosión presentada (11).

Las estructuras de protección son construidas de diversos materiales y recubiertas con material rocoso pesado en la parte sumergida, esto con el fin de proteger áreas vulnerables a la erosión, causada por flujos a alta velocidad (12). Para diseñar adecuadamente un enrocado, se tienen en cuenta varios aspectos importantes, el primero es identificar el tramo del río en el cual se requiere protección y determinar los parámetros hidráulicos que se presentan en cada uno de los puntos observados, como el tirante, la velocidad, el ancho y el área, estos datos se utilizan para realizar cálculos posteriores (13). También es importante conocer el nivel de cimentación de la roca, ya que esta se define como la profundidad a la que se debe colocar la base; de esta forma, se asegura la estabilidad de la obra. Una característica propia son las dimensiones y

geometría de la roca, lo cual establece la altura y la profundidad de la capa inferior, esto con el motivo de hacer énfasis en la selección del diámetro, la elección adecuada de estos depende de factores como la intensidad del flujo, la velocidad y el poder erosivo del río sobre el tramo a proteger (14).

La investigación tiene como principal objetivo estimar el diámetro óptimo del enrocado, el cual brinde una protección adecuada, evitando la erosión y el desplazamiento de las rocas debido a la capacidad de arrastre del flujo, determinado mediante las velocidades presentadas, validando ecuaciones matemáticas establecidas para tener en cuenta un criterio de selección del diámetro.

Metodología

Revisión y Validación de Ecuaciones

La investigación se enfoca en estimar el diámetro óptimo del enrocado como medida de protección contra la socavación en muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado, por tal motivo se llevó a cabo un estudio experimental que permitió validar cinco ecuaciones para estimar el diámetro de roca en el cual se presenta el arrastre de material con diferentes velocidades. Para dar inicio, se consultan fuentes bibliográficas entorno a la implementación de enrocado o rip-rap para la protección contra la socavación, de lo cual se observa que esta estructura ha sido implementada física y numéricamente como contramedida de blindaje, pero no para la protección de muros longitudinales; de acuerdo a esto, se validaron las ecuaciones de la división de carreteras de California, de Maynard, del departamento de transporte de EE.UU, del servicio geológico de EE.UU y de R.A Leopardo. La primera ecuación que se estableció para ser validada fue mencionada por (6), en la cual se describe la zona de influencia del proyecto, así como las características morfológicas que se presentan; así tal cual como se menciona a continuación:

Ecuación de la división de carreteras de California

De acuerdo a (15), la ecuación para la protección de riberas y zonas costeras, dispuesta por la división de carreteras de California, propone una relación entre el tamaño de la roca y la velocidad del flujo circulante en la sección a proteger tal como se presenta en la Ecuación 1.

$$D = \frac{0.00002 \cdot V^2 \cdot G_s \cdot \operatorname{cosec}^3(\rho - \theta)}{(G_s - 1)^3} \quad (1)$$

Ecuación de Maynard

De acuerdo a (14), la ecuación de Maynard dispone de una relación determinante entre la velocidad y la profundidad del flujo, para la determinación del diámetro medio de roca, tal como se presenta en la Ecuación 2.

$$d_{50} = c_1 (y F^3)$$





$$F = C_2 \left(\frac{V}{\sqrt{gy}} \right) \quad (2)$$

Los valores de C_1 Y C_2 se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de C_1 y C_2 recomendados

C_1	Fondo	Plano
0.28	Talud	1V: 3H
0.32	Talud	1V: 2H
C_2	Tramo	
1.5	Tramos en curva	
1.25	Tramos rectos	
2	Tramos extremos de espigones	

Ecuación del departamento de transporte de EE.UU

En (16) se menciona que esta propone una relación en escala inglesa para calcular el diámetro medio de roca, tal como se observa en las Ecuaciones 3-8.

$$d_{50}^I = \frac{0.001 V^3}{y^{0.5} K^{1.5}}, \text{ en sistema inglés} \quad (3)$$

$$k_1 = \left[1 - \left(\frac{\sin^2 \theta}{\sin^2 \phi} \right) \right]^{0.5} \quad (4)$$

$$C = C_{sg} * C_{sf} \quad (5)$$

$$C_{sg} = \frac{2.12}{(y_s - 1)^{1.5}} \quad (6)$$

$$C_{sf} = \left(\frac{FS}{1.2} \right)^{1.5} \quad (7)$$

$$d_{50} = C d_{50}^I \quad (8)$$

Para la selección del factor de seguridad, el Manual de hidrología, hidráulica y drenaje ha dispuesto un factor de seguridad en función a la condición de flujo presentado, en la Tabla 2 se observan los rangos de factor de seguridad.

Tabla 2. Factor de seguridad

Condición	Rango del FS
Flujo uniforme, tramos rectos o medianamente curvos (radio de la curva/ ancho del cauce > 30). Mínima influencia de impacto de sedimentos y material flotante	1.0-1.2
Flujo gradualmente variado, curvatura moderada (10 < radio de la curva/ ancho del cauce < 30). Moderada de impacto de sedimentos y material flotante.	1.3-1.6
Flujo rápidamente variado, curvas cerradas (radio de la curva/ ancho del cauce < 10), flujos de alta turbulencia, flujo de turbulencia mixta en estribo de puentes. Efecto significativo de impacto de sedimentos y material flotante	1.6-2.0

Fuente: Manual de hidrología, hidráulica y drenaje.

Ecuación del servicio geológico de EE.UU

Esta describe que el método del servicio geológico de EE.UU, es un método apropiado para la elección de diámetro de la roca de acuerdo al flujo de velocidad, de acuerdo a esto, se describe en la Ecuación 9.

$$d_{50} = 0.01V^{2.44} \quad (9)$$

Ecuación de R. A Leopard

La ecuación de R.A. Leopard mencionada en (6), describe la relación existente entre las propiedades de las rocas, con la velocidad media, el ángulo de reposo del material particular y el ángulo del talud, así como se muestra en las Ecuaciones 10 y 11.

$$W = \frac{0.011314 * \frac{Y_s}{\gamma} - V^6}{\left(\frac{Y_s - \gamma}{\gamma}\right) * SEN^3(\phi - \theta)} \quad (10)$$

$$D_s = \left(\frac{6 * W}{\pi * \lambda_s}\right)^{1/3} \quad (11)$$

Modelamiento experimental

Análisis de la socavación sin contramedida de rip-rap

En esta investigación se realizó modelación física en un canal hidráulico fabricado en acrílico, de dimensiones 0.309 m de ancho, 5 m de largo y 0.4 m de alto, en el cual se instaló un canal interior de dimensiones 0.29 m de ancho, 1.6 m de largo y 0.4 m de alto,



en este último, se incorporó un lecho granular, constituido por arena fina, arena gruesa y gravilla, con un coeficiente de uniformidad CU de 22.20, determinado por la relación d_{60}/d_{10} del material granular, en la cual, para los diámetros correspondientes, el tamaño del grano es igual o menor al tamaño del tamiz. Este coeficiente de uniformidad es característico de ríos con lecho granular bien gradado en los cuales el $CU > 20$; en este sentido, la investigación incorpora material granular con diámetro medio D_m de 0.00418 m, se dispuso un lecho de 0.29 m de ancho por 1.6 m de largo por 0.12 m de alto, el cual está constituido en su mayoría por arena fina con un porcentaje representativo del 40 % del total del lecho y la cual tiene un diámetro medio de 0.00030 m, de la misma forma se incorpora un 29% de arena gruesa con un diámetro de 0.00093 m y como tercer constituyente se introdujo un 31 % de gravilla, con un diámetro de 0.00618 m; así mismo, se tienen ángulos de reposo de 29° , 29° y 31° respectivamente. Se efectuaron las mediciones para caudales de 0.017, 0.025 y 0.030 m^3/s y graduación de la pendiente entre 1.0 y 2.5 %, en los cuales se midieron las profundidades de socavación presentadas en cada una de las condiciones evaluadas, sin la presencia de la estructura de protección (rip-rap), esto con el fin de determinar el impacto de la disposición de la contramedida en la socavación local generada a lo largo de la base del muro longitudinal, el cual se evalúa en condición de empotramiento en el lecho. De esta forma, el flujo se controla mediante una válvula reguladora, con la cual se ajusta de acuerdo a cada caudal analizado en la investigación, los cuales se evalúan para cada una de las pendientes propuestas; así mismo, el arrastre de material particular del lecho, pasa a ser depositado en una cámara que funciona como sedimentador, para luego ser removido, por lo cual, el desarrollo experimental se realiza en agua clara sin presentar recirculación de sedimento. En la Figura 1 se presenta el canal experimental del laboratorio.



Figura 1. Canal experimental

Posteriormente, se diseñó y construyó un modelo físico a escala en el que se simulaban las condiciones hidráulicas y geométricas de una sección a gran escala en las que se dispuso la contramedida de enrocado o rip-rap. En este modelo se evaluó la velocidad en la cual se presenta el arrastre de material rocoso, por tal motivo se seleccionaron cuatro diámetros de roca caliza, los cuales fueron de $\frac{3}{4}$ ", 1", $1\frac{1}{4}$ " y $1\frac{1}{2}$ " ubicados a lo largo del lecho con las dimensiones del mismo, en este sentido, se disponen estos

diámetros de roca debido a las restricciones de dimensión de la infraestructura física, con el fin de no generar contracción del ancho del canal y estrangular el flujo, lo cual ocasiona aumento en las velocidades y, por ende, socavación por vectores de flujo y velocidades críticas de arrastre de material. En vista de lo anterior, se dispone la contramedida hasta ocupar un máximo del 40 % del ancho del canal, así como también, se extiende hasta ocupar la misma dimensión de largo del lecho, con el fin de evaluar la socavación a lo largo del mismo luego de la disposición de la contramedida y el arrastre de material a lo largo de este. Así mismo, el diseño experimental se dispone para ejecutarse en un tiempo total de 240 minutos por modelación, en los cuales se realiza medición de la socavación en puntos de control dispuestos cada 0.1 m en el lecho, en estos se miden las profundidades de socavación, la deposición de material arrastrado y las velocidades presentadas, tanto sin la contramedida, como luego de la disposición de la misma. En la Figura 2 se observa la disposición del rip-rap en el canal junto al lecho instalado y nivelado.

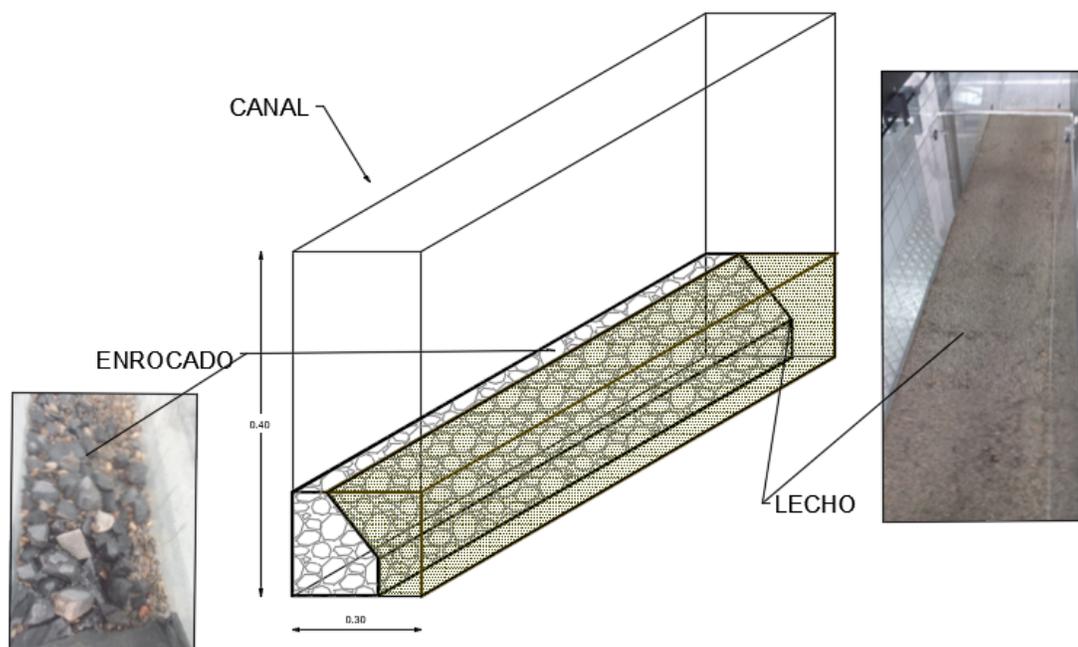


Figura 2. Diseño del enrocado en AutoCAD

Resultados

De acuerdo con los resultados del desarrollo experimental, así como de la validación de las ecuaciones con estos, se determinan los diámetros en los cuales la velocidad del flujo arrastra la roca caliza del enrocado. En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos de la validación de cada una de las ecuaciones a escala experimental.



Tabla 3. Validación de ecuaciones a escala experimental

	Resultados	Ecuación de la división de carreteras de California	Ecuación de Maynard	Ecuación del	Ecuación del servicio geológico de EE.UU	Ecuación de R.A
	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
	0.551	0.0190	0.0217	0.0088	0.0098	0.0041
	0.688	0.0205	0.0338	0.0171	0.0191	0.0071
	0.826	0.0285	0.0488	0.0297	0.0330	0.0111
	0.964	0.0332	0.0663	0.0471	0.0524	0.0161
	1.101	0.0410	0.0866	0.0703	0.0782	0.0224

En la Figura 4 se presenta la gráfica de los valores a escala experimental, obtenidos de la validación de las ecuaciones.

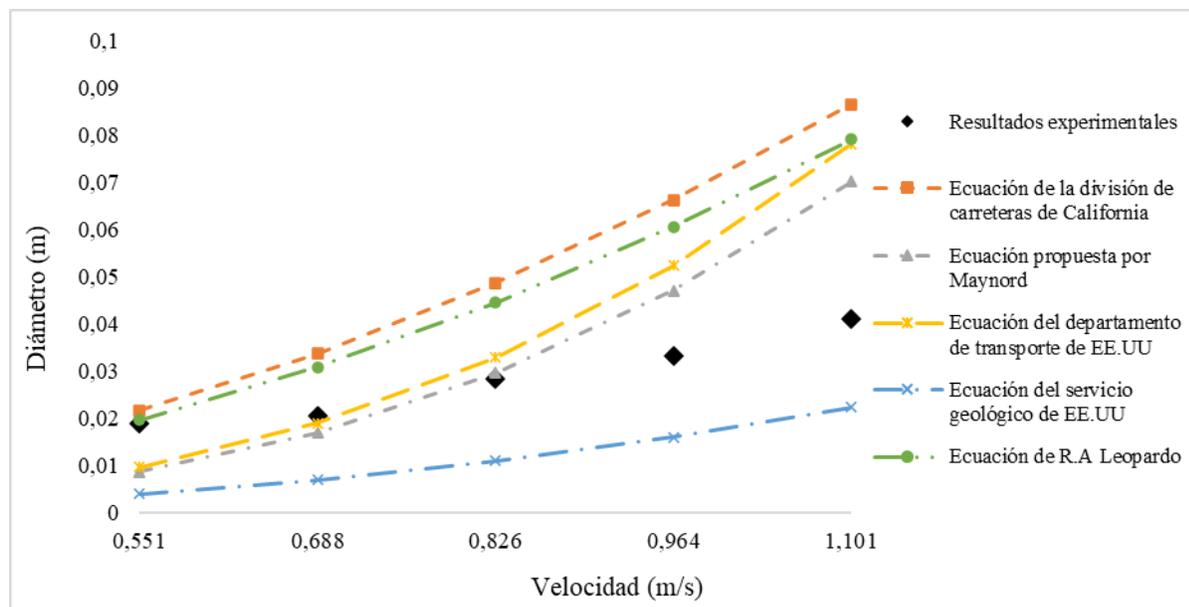


Figura 4. Validación de ecuaciones a escala experimental

De acuerdo a lo presentado en la Tabla 3, se observa que en el desarrollo experimental se alcanzan velocidades de arrastre hasta el diámetro de rocas de 1¼", siendo este el diámetro máximo de arrastre que alcanza el modelo experimental; así mismo, se observa la validación de las ecuaciones para la estimación del diámetro de roca, en las cuales se presentan variaciones por encima y por debajo de las observadas en el desarrollo experimental, por lo cual, se puede afirmar que estas ecuaciones no se ajustan a las

condiciones evaluadas en la investigación, por tanto, el diámetro de roca estimado varia en algunas ecuaciones. De la misma forma, con el fin de dar validación a las ecuaciones de determinación del diámetro de la roca para la disposición del enrocado o rip-rap, se analiza un entorno a escala real, a mayor escala en comparación con el modelo del laboratorio; en este sentido, mediante las Ecuaciones 12-15, se aplican factores de escala, teniendo en cuenta las leyes de similitud del modelo, en este caso, se escala con respecto a las velocidades presentadas en el modelo experimental.

$$\lambda L = \frac{1}{n} = \frac{Y''_n}{Y'_n} \quad (12)$$

$$\lambda Q = \frac{Q''_n}{Q'_n} \quad (13)$$

$$\lambda L^{5/2} = \frac{Q''_n}{Q'_n} \quad (14)$$

$$\lambda V = \sqrt{\lambda L} \quad (15)$$

Siendo: λL : el factor de escala longitudinal; λQ : el factor de escala de caudal; λV : el factor de escala de velocidad; Y''_n : altura de la lámina de agua en el modelo experimental; Y'_n : altura de la lámina de agua en el prototipo; Q''_n : caudal del modelo experimental; Q'_n : caudal del prototipo.

En la Tabla 4 se presentan los valores obtenidos de la validación de las ecuaciones con los resultados obtenidos del modelo escalado.

Tabla 4. Validación de ecuaciones en el modelo escalado

	Resultados escalados	Ecuación de la división de carreteras de California	Ecuación de Maynard	Ecuación del	Ecuación del servicio geológico de EE.UU	Ecuación de R.A
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
(m/s)						
2.01	0.2533	0.289	0.117	0.130	0.055	0.264
2.51	0.2733	0.451	0.228	0.254	0.095	0.412
3.02	0.38	0.65	0.395	0.440	0.148	0.594
3.52	0.4426	0.884	0.627	0.698	0.215	0.807
4.02	0.5466	1.155	0.937	1.043	0.298	1.055

En la Figura 5 se presenta la gráfica obtenida de la validación de ecuaciones con los datos obtenidos en el modelo escalado.

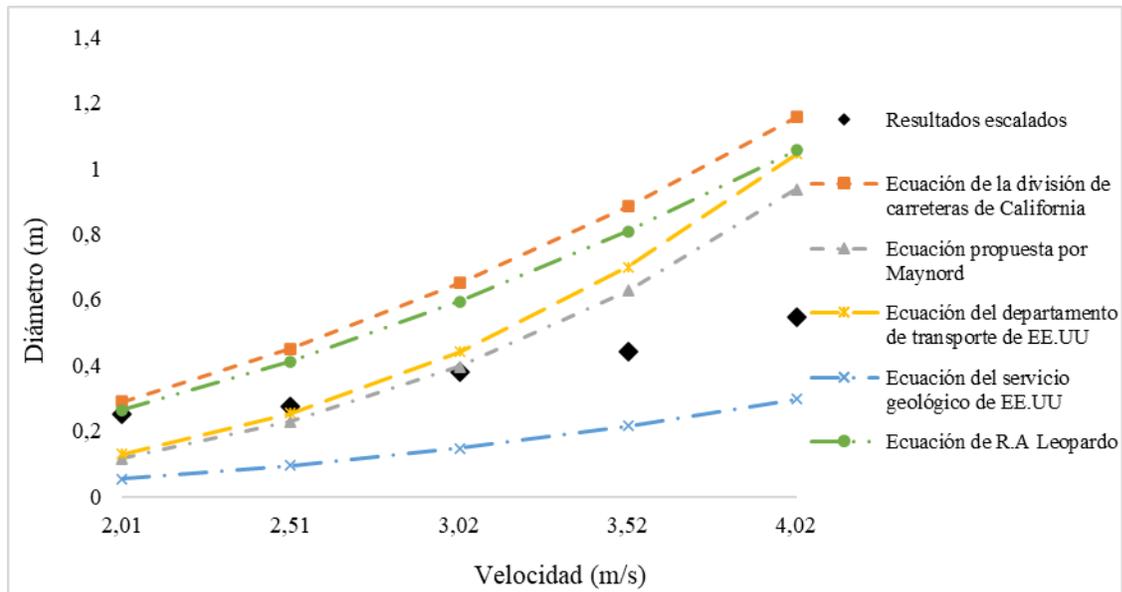


Figura 5. Validación de ecuaciones en el modelo escalado

Mediante los resultados presentados en la validación de las ecuaciones mencionadas anteriormente, se observa que los diámetros obtenidos a partir de cada uno de estos cambian en algunos casos, tal como se presenta en la tabla 4, las ecuaciones de la división de carreteras de California y la de R. A. Leopardo sobreestiman el arrastre de material de roca caliza, tal como se observa en los resultados experimentales, en los cuales, con una velocidad de 0.551 m/s, presentan movilidad de tamaños de roca de 0.0217 m y 0.0198 m, respectivamente, los cuales se encuentran dispersos por encima de los valores observados del modelo experimental, presentando errores relativos de estimación del diámetro de roca del 109.27 % y 91.29 % respectivamente. Por otra parte, la ecuación del servicio geológico de Estados Unidos subestima el diámetro de arrastre de material, obteniendo con velocidades de 0.551 m/s, movilización de material de 0.0041 m, valores muy por debajo de los observados en el modelo de laboratorio, representando así, un error relativo entre datos observados y estimados del 51 %; de la misma forma se observa que, mediante ecuaciones como la de Maynard y la propuesta por el departamento de transporte de Estados Unidos, se determinan diámetros óptimos de arrastre de sedimento de roca caliza, ya que, los resultados obtenidos mediante la implementación de estas ecuaciones, son similares a los observados en el modelo experimental, presentando porcentajes absolutos de variación de datos menores al 30 % para las dos ecuaciones, por lo cual, la amplitud del margen de error entre datos observados y estimados es baja, en comparación con los obtenidos mediante las otras ecuaciones validadas en la investigación.

Mediante el análisis de los diámetros obtenidos para las ecuaciones validadas se puede deducir que existe una tendencia entre los valores observados de los diámetros para cada una de las ecuaciones validadas, lo cual presenta que, a medida en que se aumenta la velocidad, se observa un aumento gradual en los diámetros de arrastre,

esto indica una relación directa entre el diámetro de roca y la velocidad y capacidad erosiva del flujo, ya que, así como aumenta el diámetro de arrastre, se observan mayores profundidades de socavación a lo largo de la base del muro. En comparación con los resultados de las ecuaciones validadas de los distintos métodos, se puede deducir que, aunque estas permiten determinar el diámetro para la disposición de rocas en el rip-rap, dos de estas ecuaciones sobreestiman y una subestima el diámetro óptimo de roca, lo cual indica que el cálculo obtenido ofrece una medición con cierto margen de error, lo cual debe ser tenido en cuenta en la toma de decisiones en cuanto a la elección del diámetro para la construcción de una estructura de rip-rap para protección. Así mismo, se observa una correlación entre algunos de los distintos métodos, ya que, aunque algunos presenten cierto grado de error en la determinación del diámetro en comparación con los otros, la aplicación de las ecuaciones anteriormente mencionadas, facilitan la determinación y toma de decisiones coherentes y/o precisas, en cuanto a la disposición absoluta o relativa de diferentes diámetros de roca caliza para la disposición de una estructura de enrocado.

De la misma forma, cuando se dispone de datos de referencia o mediciones confiables, se puede realizar una evaluación de la precisión de cada método, es decir, esto implica comparar los valores obtenidos por cada método con los valores de referencia y calcular errores absolutos o relativos, esto proporciona información sobre qué método se acerca más a los datos reales; de acuerdo a esto, se puede afirmar que, si los métodos proporcionan resultados inconsistentes o con una alta variabilidad entre ellos, se debe investigar la razón de estas diferencias, ya que puede haber diferencias en los supuestos subyacentes, los modelos utilizados o las condiciones de prueba de cada ecuación. Analizar la variabilidad entre los métodos puede ayudar a identificar posibles fuentes de error o incertidumbre en las mediciones, estas discrepancias sugieren que cada método utiliza diferentes enfoques o modelos para calcular el diámetro, lo que conduce a resultados divergentes. Es importante tener en cuenta qué método se considera más confiable o apropiado para el propósito específico del análisis, de acuerdo a las condiciones del entorno en el que se aplique cada ecuación.

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que el uso de rocas de 1¼" o mayores son efectivas para reducir la profundidad de socavación en las condiciones analizadas en la investigación, así como mantener bajo el índice de arrastre de material del rip-rap. Estos hallazgos son relevantes para el diseño y la implementación de medidas de control de la erosión en ríos y canales, y podrían ser considerados en proyectos, como medida de protección contra la socavación en muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado.

Al analizar las velocidades experimentales en el estudio y considerar la capacidad de resistencia del enrocado, se observa que a lo largo del canal es necesaria la implementación de rocas de mayor tamaño en la base para la disposición del enrocado y diámetros más bajos en la parte alta del talud, esto garantiza mayor estabilidad frente a velocidades altas de flujo, con lo cual se contrarresta la fuerza de arrastre sobre las rocas dispuestas en el lecho. Es importante tener en cuenta estas consideraciones en el diseño de estructuras de rip-rap para asegurar una protección adecuada contra la erosión y el



deterioro de las estructuras hidráulicas como los muros longitudinales.

Los métodos utilizados para calcular el diámetro arrojan resultados divergentes en varios casos, esto indica que existe una variabilidad entre los métodos y los enfoques de aplicabilidad de los mismos para estimar el diámetro de arrastre en función de las velocidades de flujo. Al comparar los resultados de la validación de las ecuaciones, es necesario considerar cuál método se ajusta mejor a las necesidades específicas del análisis o aplicación en particular, ya que es posible que ciertas ecuaciones sean más precisas en determinadas condiciones, como las que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de la investigación.

De esta forma, el estudio demuestra que mediante la implementación de las ecuaciones propuestas por Maynard y por el departamento de transporte de Estados Unidos, se estiman los diámetros óptimos de roca para la disposición del rip-rap, presentando variación entre diámetros estimados y observados menores al 30 %, en comparación con las ecuaciones de la división de carreteras de California y la de R. A. Leopardo, que sobreestiman los diámetros de roca, mientras que la del servicio geológico de Estados Unidos que subestima el diámetro. Cabe recalcar que las ecuaciones fueron validadas con los resultados obtenidos en el desarrollo experimental, por lo cual, están sujetas a limitaciones en cuanto al margen de error de mediciones realizadas, así como también, a las condiciones de pendiente, caudal, empotramiento del muro, tipo de lecho y diámetros de roca del rip-rap analizadas en la investigación.

La variabilidad entre los métodos puede indicar posibles fuentes de error o incertidumbre en las mediciones. Es fundamental comprender las diferencias subyacentes en los supuestos, modelos y condiciones de prueba de cada método para interpretar adecuadamente los resultados y comprender sus limitaciones. En general, este análisis resalta la importancia de comprender y evaluar las ecuaciones utilizadas para calcular el diámetro de roca; además, destaca la necesidad de considerar la variabilidad y la precisión de los resultados al utilizar diferentes enfoques.

Nomenclatura

θ : ángulo de inclinación del talud.

ϕ : ángulo de reposo del material.

ρ : densidad del flujo (Kg/m^3).

γ : peso específico del fluido (Kg/cm^3 , Tn/m^3).

λ_s : peso específico del material de enrocado (lb/ft^3).

C_1 Y C_2 : coeficientes de corrección.

C, k_1 : factor de correcciones

C_{sf} : coeficiente de corrección por factor de seguridad.

C_{sg} : coeficiente de corrección por el peso específico.

D, d_{50}, D_s : diámetro equivalente del enrocado (m).

F : número de Froude.

FS : factor de seguridad.

G_s : densidad relativa de la partícula

V : velocidad del flujo (m/s).

W : peso de la roca (lb).

y : profundidad de flujo (m);

γ_s : peso específico del material del enrocado (Kg/cm^3 , Tn/m^3).

Referencias bibliográficas

1. Hernández-Urbe R, Barrios-Piña H, Ramírez A. Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. Tecnología y Ciencias del Agua [Internet]. 2017 Oct 12;VIII:5–24. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/320418701>
2. Amado-Rojas H. Estructuras hidráulicas. 2008.
3. Cely N, Vergel M, Rincón O. Cambio climático: retos para la ingeniería civil. 23a ed. Bogotá: Ecoe ediciones Colombia; 2022. 91 p.
4. Cely NJ, Cortés M, Galvis A, Carrillo GA. Analysis of a three-dimensional numerical modeling approach for predicting scour processes in longitudinal wall of granular bedding rivers. EUREKA, Physics and Engineering. 2023 Jul 27;2023(4):168–79.
5. Teixeira L, Vilaseca F, Chreties C. Avances para el estudio del efecto de la viscosidad en el dimensionado de enrocado de protección de pilas de puentes. Aqua-LAC. 2016 Mar 31;8:58–61.
6. Cieza L. Análisis, evaluación y diseño de defensas ribereñas en el cauce de la quebrada Montería en el sector centro poblado menor Tablazos, distrito Chongoyape-Chiclayo. [Chiclayo]: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo; 2022.
7. Zambrano K, Zambrano J, Zambrano L, Solórzano J, Valdivieso B, Zambrano C. El impacto de las construcciones civiles. Portoviejo; 2019 Dec.
8. Cely N, Cárdenas J. (2004). Impacto Ambiental de las obras civiles. (Issue 1).
9. Collazo F, Araya W. Modelo Hidráulico para Redes de Canales con Estructuras Hidráulicas. Revista Tecnología en Marcha. 2019 Apr 24.
10. Muñoz S, Llamo J. Revisión sistemática de la implementación BIM basada en modelos de diseño para la construcción de obras viales. Cuaderno Activa. 2022 Dec 18;14:119–33.
11. Alvarado-Ancieta C. Protección de la erosión en curvas abruptas usando enrocado rip-rap. Tecnología y Ciencias del Agua. 2013 Jan;IV:51–82.





12. Khosronejad A, Diplas P, Angelidis D, Zhang Z, Heydari N, Sotiropoulos F. Scour depth prediction at the base of longitudinal walls: a combined experimental, numerical, and field study. *Environmental Fluid Mechanics*. 2019 Apr 1;20(2):459–78.
13. Celik A, Diplas P, Dancey C, Valyrakis M. Impulse and particle dislodgement under turbulent flow conditions. *Physics of Fluids*. 2010;22(4):1–13.
14. Manual de hidrología, hidráulica y drenaje [Internet]. Editorial Macro; 2011. (Ingeniería y gestión). Available from: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat07246a&AN=udv.819263&lang=es&site=eds-live>
15. González J. Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta. 2004.
16. Maldonado G. Diseño de enrocados de protección de la relavera La Esperanza-Río Tulumayo. [Lima]: Universidad Nacional Mayor de San Marcos; 2016.