



¿CÓMO LA BIOINGENIERÍA INFLUYE EN LA ESTABILIZACIÓN DE LADERAS Y EN LA MITIGACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA?

HOW BIOENGINEERING INFLUENCES SLOPE STABILIZATION AND WATER EROSION MITIGATION?

Gabriel Omar Carrasco Rosales
Martín Diego Vargas Allca
Esther Joni Vargas Chang
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

RECIBIDO: 31 de octubre de 2023.
ACEPTADO: 13 de diciembre de 2023.

RESUMEN

El objetivo de la investigación es elaborar un estado de conocimiento sobre el uso de la bioingeniería en proyectos ingenieriles a nivel nacional y en la región Hispanoamérica. Se evalúa la influencia de las principales técnicas utilizadas, valorándose aquellos que incluyen el aporte de las raíces del material vegetativo en el modelo Mohr – Coulomb y el empleo de los métodos de las varillas de erosión y RUSLE para estimar la erosión hídrica de un talud natural (ladera) inestable. La investigación es de tipo documental - explicativa con enfoque comparativo pues se contrasta el valor del factor de seguridad con y sin vegetación y el valor de la erosión actual mediante modelos SIG y el método directo de clavos de erosión. Se concluye que el empleo de vegetación, de manera simple o colectiva, para mejorar y proteger suelos inestables, influye en el valor del factor de seguridad, el cual se incrementa sustantivamente, y minimiza la cantidad de suelo erosionado.

Palabras claves: bioingeniería, erosión hídrica, estabilidad de taludes, laderas, modelo Mohr–Coulomb, sostenibilidad.

Cómo citar

G. O. Carrasco Rosales, M. D. Vargas Allca, y E. J. Vargas Chang, «¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 19, n.º 20, pp. 73–92, dic. 2023.

ABSTRACT

The objective of the research is to develop a state of knowledge about the use of bioengineering in engineering projects at the national level and in the Latin American region. The influence of the main techniques used is evaluated, evaluating those that include the contribution of the roots of the vegetative material in the Mohr - Coulomb model and the use of the erosion rod and RUSLE methods to estimate the water erosion of a natural slope (slope) unstable. The research is documentary - explanatory with a comparative approach since the value of the safety factor with and without vegetation and the value of current erosion are contrasted using GIS models and the direct method of erosion nails. It is concluded that the use of vegetation, simply or collectively, to improve and protect unstable soils, influences the value of the safety factor, substantially increasing, and minimizing the amount of eroded soil.

Keywords: bioengineering, water erosion, slope stability, slopes, Mohr–Coulomb model, sustainability.

© Los autores. Este artículo Open Access esta publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0).



1. Introducción

Es práctica común en ingeniería definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, parámetros geológicos, presencia de grietas de tensión, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etcétera [1].

La erosión hídrica es un fenómeno ocasionado por acción de fuerzas hidráulicas, las cuales actúan sobre las partículas de suelo produciendo su desprendimiento y posterior transporte. De manera genérica, la erosión del suelo consiste en la pérdida de sus partículas por fragmentación y arranque, con el posterior desplazamiento aguas abajo, por efecto del agua, el viento, la gravedad y el laboreo agrícola o asociado a la ingeniería civil [2]. Según Espinoza y Martínez, “en el Perú, el tema de la erosión hídrica resulta crítico, ya que nos encontramos ante un contexto climático y topográfico definido por la Cordillera de los Andes, con patrones de precipitación complejos y pendientes muy empinadas” [3].

La vegetación en taludes cumple la función de estabilización y control de erosión, lo que conduce a una prevención y regulación de esorrentía [4]. La bioingeniería proporciona soluciones eficaces en términos de costo a muchas de las preocupaciones medioambientales conexas al desarrollo de la infraestructura y a la creciente erosión del suelo.

Por tal motivo, este estudio proporciona un marco de investigación para evaluar el impacto generado por el uso de material vegetativo, vivo o muerto, en el valor del factor de seguridad y en el control de la erosión hídrica en laderas susceptibles a remociones en masa. Los datos utilizados en este documento se basan en normativas internacionales y, sobre todo, en tesis de grado e investigaciones científicas de libre acceso en la red. El interés del presente artículo se extiende a nivel nacional y de la región hispoamérica pues permite de elaborar un estado actual del tema propuesto.

Finalmente, se presenta los resultados en torno a la cantidad de investigaciones por países, las técnicas de bioingeniería más utilizadas, la cuantificación del factor de

seguridad en contraste con el valor mínimo exigido y la comparación de la erosión hídrica entre los modelos RUSLE y clavos de erosión.

2. Objetivos

Objetivo general:

- Determinar las técnicas de bioingeniería aplicadas en proyectos de ingeniería en la región Hispanoamérica

Objetivos específicos:

- Describir la influencia del material vegetativo en la determinación del factor de seguridad de un suelo inestable
- Describir la influencia de la vegetación en torno al suelo erosionado por la erosión hídrica
- Clasificar la erosión hídrica según el modelo RUSLE

3. Fundamento Teórico

3.1 Estabilidad de Talud

Se entiende por talud a un terreno o superficie de suelo que presenta una inclinación con respecto a la horizontal que, según su origen, puede ser artificial (talud) o natural (ladera). Estas estructuras pueden fallar de forma imprevista debido a factores antrópicos o

naturales que alteren su estado natural de estabilidad. Por ello, es necesario caracterizar y clasificar el mecanismo de rotura a fin de brindar soluciones oportunas y evitar medidas contraproducentes.

En mecánica de suelos, el criterio de rotura generalmente empleado es el de Mohr-Coulomb, el cual permite definir la tensión tangencial o de corte que se alcanza en un plano en función de la tensión efectiva sobre el mismo y los parámetros resistentes del suelo [5].

La estabilidad de un talud se define por el factor o cociente de seguridad, el cual relaciona las fuerzas resistentes y desestabilizadoras de una masa de suelo, donde la

principal fuerza opositora al movimiento en la superficie crítica de deslizamiento corresponde a la resistencia al corte, mientras que el peso de la masa de suelo resulta ser la más influyente en el proceso desestabilizador en conjunto con otras fuerzas como las sobrecargas, la acción del agua, del viento y sísmica.

Figura N° 1. Coeficientes de seguridad a emplear en el análisis de estabilidad de taludes

Tabla 1/ Coeficientes de seguridad a emplear en el análisis de estabilidad de taludes				
NORMATIVA	TALUD TEMPORAL		TALUD PERMANENTE	
	ESTÁTICA	SÍSMICA	ESTÁTICA	SÍSMICA
AASHTO LRFD	1,33-1,53	1,1	1,33-1,53	1,1
NAVFAC-DM7	1,3-1,25	1,2-1,15	1,5	1,2-1,15
FHWA-NHI-11-032	-	1,1	-	1,1
CE.020	-	-	1,5	1,25

Fuente: Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo. Revista Civilizate (2015)

Los métodos de estudio de estabilidad de taludes se agrupan en dos grupos principales: los métodos de equilibrio límite (LEM) y los métodos numéricos (cálculos de deformaciones). A su vez, los LEM se dividen en exactos y no exactos. Este último agrupa el método del círculo de fricción (estabilidad global) y el método de las dovelas o rebanadas (estabilidad parcial), el cual se subdivide en aproximados (método de Fellenius, Bishop y Janbú) y precisos (método de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop modificado).

3.2 Erosión Hídrica

La erosión puede definirse como el desgaste del suelo o roca debido a fuerzas naturales o acciones antrópicas. Las partículas desprendidas son transportadas por la fuerza y energía de los agentes erosivos hasta el posterior depósito del material (sedimentación). Según sea la fuente de acción, la erosión puede ser hídrica (el agua o hielo “labra”), eólica (el viento “modela” o “esculpe”) y la gravitatoria (“caída libre”). Entre los principales tipos de erosión se tiene:

Erosión por el viento: el movimiento del viento ejerce fuerzas de fricción y levantamiento sobre las partículas de suelo, desprendiéndolas, transportándolas y depositándolas.

¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?

- Erosión por gotas de lluvia: cuando las gotas de agua impactan el suelo desnudo pueden soltar y mover las partículas a considerables distancias.
- Erosión laminar: las corrientes superficiales de agua pueden producir el desprendimiento de las capas más superficiales de suelo en un sistema de erosión por capas que se profundizan.

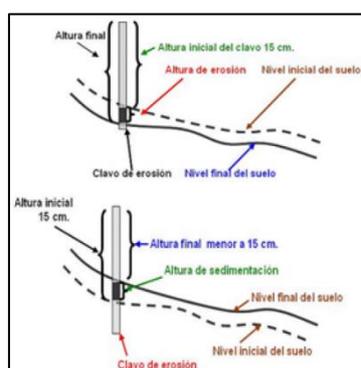
3.3 Estimación de Suelo Erosionado

a) Método de las varillas o clavos de erosión:

Es un método directo que consiste en fijar varillas o clavos de hierro dentro de parcelas para estimar la erosión hídrica producida en un sector y periodo determinado.

La cuantificación del suelo erosionado (t/ha/año) se realiza a través de una fórmula que está en función del producto de la lámina perdida (mm), área medida (m²) y densidad aparente (t/m³). Para complementar el análisis se debe tomar en cuenta los registros de precipitaciones dados durante el periodo del estudio y correlacionarla con la cantidad de suelo perdido. Como referencia a trabajos previos, la duración del estudio varía entre 6 a 12 meses con periodos de control entre 15 a 20 días, y se obtiene, en promedio, 2 registros por mes.

Figura N° 2. Medición en los clavos de erosión



Fuente: Proyecto FDI (2005)

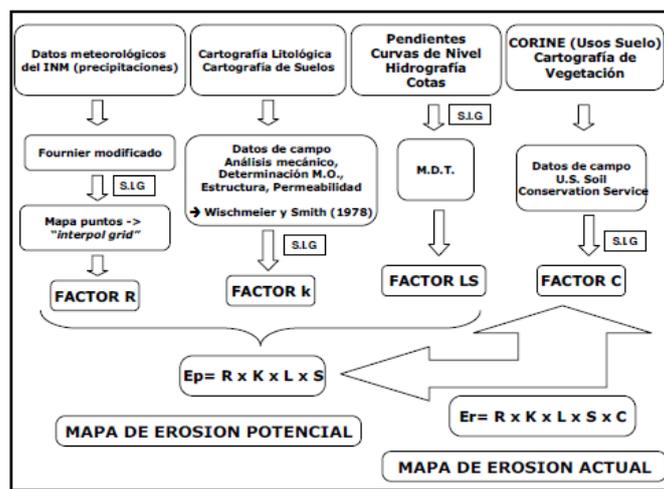
b) Método RUSLE:

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisado (RUSLE) es un método de evaluación indirecta que estima las pérdidas de suelo anuales (valor promedio) por procesos de erosión hídrica ante determinadas condiciones de clima, suelo, relieve, vegetación y uso del suelo. La ecuación permite elaborar mapas de erosión potencial y

actual a través de un sistema de información geográfica (SIG) que involucra los siguientes factores:

- Factor de erosividad (R)
- Factor de erosionabilidad (K)
- Factor de longitud de pendiente (L)
- Factor de inclinación de pendiente (S)
- Factor de uso de suelos (C)
- Factor de prácticas de conservación (P)

Figura N° 3. Factores implicados en el método RUSLE



Fuente: Proyecto FDI (2005)

3.4 Bioingeniería

La bioingeniería, biotecnología, ingeniería biológica o bioestabilización de taludes es una disciplina de carácter constructiva que se vale de técnicas mediante la inclusión de vegetación viva o muerta de pastos, hierbas, arbustos, árboles y otros tipos de vegetación en el diseño de ingeniería para mejorar y proteger laderas, terraplenes y estructuras de los problemas relacionados con la erosión y otros tipos de derrumbes superficiales en laderas.

La bioingeniería utiliza los efectos mecánicos e hidrológicos benéficos de una comunidad de plantas para cumplir una función de ingeniería. La vegetación puede aumentar la resistencia del suelo al agrietamiento, proteger de la erosión laminar una superficie de suelo expuesta y atrapar las partículas de suelo que se deslizan por el talud.

¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?

Las habilidades de la bioingeniería se encuentran en la movilización de los efectos benéficos de la vegetación en cualquier situación. La vegetación que es seleccionada para las condiciones particulares del lugar, que se establece bien y se siembra con suficiente densidad, puede proporcionar una eficaz protección a la superficie del talud [6].

Figura N° 4. Soluciones de ingeniería convencional y de bioingeniería

PROBLEMA	SOLUCIÓN INGENIERÍA CONVENCIONAL	SOLUCIÓN BIOINGENIERÍA
Ladera inestable o deslave.	Muro de retención, gaviones	Reforestar con árboles al pie de la ladera o cerro.
Suelos inestables saturados de agua	Muros reforzados	Barreras densas vivas, escalones de matorral, fajinas vivas
Erosión de suelos cárcavos	Muros de retención gaviones.	Barreras densas vivas, vallas de retención.

Fuente: Cooperación Suiza en América Central (2013)

4. Metodología

La investigación del presente artículo es de tipo documental pues a través de la búsqueda, recopilación, análisis e interpretación de datos obtenidos de otros trabajos de investigación, busca informar y elaborar un estado de conocimiento acerca del tema de estudio. Asimismo, la investigación clasifica como explicativa ya que pretende explicar la influencia de las raíces de la vegetación en torno al cociente de seguridad y el impacto de la vegetación en el proceso erosivo de un suelo inestable.

El enfoque de la investigación corresponde al tipo mixto pues se contrasta datos del factor de seguridad obtenidos, con y sin el uso de vegetación, con la normativa nacional vigente y el valor de la erosión actual obtenido mediante modelos SIG y el método directo de clavos de erosión, según la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). En esa misma línea, la cantidad y las técnicas de bioingeniería más aplicadas en la región de Hispanoamérica en las áreas de geotecnia, infraestructura vial e hidrografía.

Los documentos electrónicos que se revisaron y que quedaron seleccionados, previo juicio de jerarquización y filtración, fueron aquellos que profundizaron más en el tema de las técnicas de bioingeniería y a la cuantificación de la erosión hídrica. Para ello, se realizó una búsqueda con palabras claves en repositorios académicos, revistas

científicas y conferencias en la región de Hispanoamérica con especial interés en el ámbito nacional.

Finalmente, se elaboraron gráficos y tablas usando Microsoft Excel con las siguientes variables: país de procedencia, técnicas de bioingeniería, factor de seguridad, área de estudio, métodos de varillas de erosión, modelo y clasificación RUSLE. De esta manera, se ordenaron los resultados obtenidos a fin de analizar los datos.

5. Presentación de Resultados

5.1 Investigaciones en la región Hispanoamérica

Figura N° 5. Cantidad de publicaciones por países en torno a la bioingeniería y la erosión hídrica



Elaboración propia

Se observa que el país latinoamericano que más aborda el tema de estudio es Colombia seguido por Perú. Ambos países, junto con España, representan el 60 % de las investigaciones. Cabe destacar, que el país europeo cuenta con manuales y normativas nacionales e internacionales, al igual que la región de Centroamérica. Los países que completan la lista son Cuba con 3 publicaciones (10 %), Costa Rica, Guatemala, México, Nicaragua y Panamá con 1 publicación (3 %) respectivamente. Las investigaciones totalizan un total de 35 publicaciones entre tesis de grado, artículos científicos y conferencias.

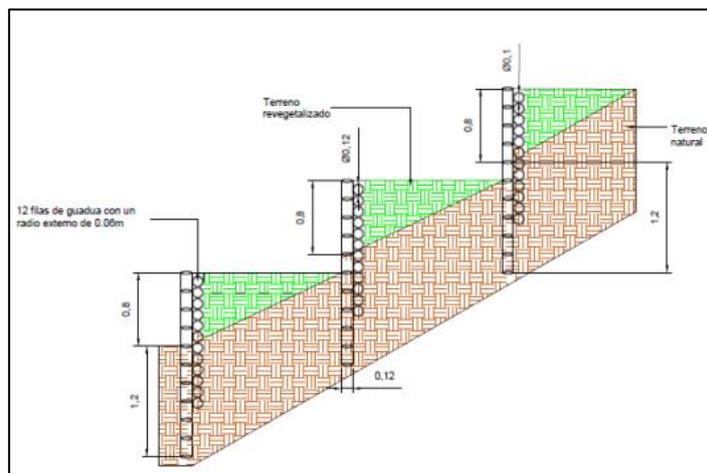
5.2 Técnicas de Bioingeniería Según Área de Estudio**Tabla N° 1.** Técnicas de estabilización biotécnica empleadas según área de estudio

Técnica de Bioingeniería	Área de estudio		
	Geotecnia	Hidráulica	Infraestructural vial
Muro Krainer	-	-	1
Hidrosiembra	1	-	1
Revegetalización	1	1	1
Pasto Vetiver	-	1	1
Geomantos o geomallas	1	1	1
Manta o red orgánica	-	-	1
Trinchos vivos	2	-	-
Terrazas escalonadas	2	-	-
Total	7	3	6

Elaboración propia

En el área de geotecnia, los trinchos vivos y las terrazas escalonadas fueron las técnicas más utilizadas para tratar potenciales remociones en masa, producto de escorrentía superficial, y controlar el proceso erosivo. Los investigadores diseñaron un sistema de bioingeniería que incluyeron las siguientes obras:

Para la construcción de terrazas se realizaron zanjas de infiltración y se usó la guadua (carrizo) como filtro drenante. Los trinchos disipadores se construyeron para estabilizar y disipar la energía cinética del agua sobre el terreno. Se aplican para taludes con pendiente promedio del terreno 45 % (24.23 °). La distancia entre terraza es de 3 m en promedio, aunque se sugiere calcularlo. Se sugiere también que su construcción inicie desde la base o pie hasta la corona del talud. Por otro lado, la hidrosiembra es una técnica que permite optimizar procesos y tiempos, aunque el costo de equipos, maquinarias y mano de obra resultan menos económicos.

Figura N° 6. Terrazas vivas

Fuente: Diseño de obra de bioingeniería para el manejo en procesos de remoción en masa y aguas superficiales (Nova, 2018)

La hidrosiembra es una técnica de recubrimiento que sirven para prevenir la erosión superficial y que consiste en aplicar una mezcla de agua, semillas, fertilizantes, fijadores y mulch de fibra de madera en el terreno. La mezcla de herbáceas tiene un porcentaje de gramíneas del 70% y un porcentaje de entre un 20-25% de leguminosas. A esta mezcla se le puede añadir entre un 5-10% de arbustivas. Para que la mezcla sea homogénea, tendrá que ser mezclada de forma continua para evitar la sedimentación de los componentes (Sangalli, 2014, como se citó en Fernández, 2019). La proyección de la mezcla sobre el suelo desnudo se realiza exclusivamente con la máquina hidrosembradora y su uso está limitado por la zona de acceso al talud y la altura del brazo.

En el campo de la hidráulica, las investigaciones se enfocaron en brindar soluciones en laderas de cuencas hidrográficas empleando el pasto vetiver (*Vetiveria zizanioides*) y la revegetalización con especies nativas. El primero de estos desarrolla gran densidad de raíces fibrosas en variedad de condiciones de sitio (suelo), que capturan el material erosionado, y refuerzan y protegen el talud del impacto de las gotas de lluvia. Para el éxito de la técnica se debe recortar las raíces existentes de cada retoño a una longitud de 30 mm, lo que evita dañar la base, y el tallo del retoño hasta 100 mm. Los retoños preparados serán colocados en manojos de aproximadamente 20 plantas para facilitarlos en huecos de siembra de unos 70 a 100 mm de profundidad y 50 mm de ancho, de manera que sea suficiente para su colocación sin doblar las raíces.

El espaciamiento sugerido de la *Vetiveria zizanioides* para el control efectivo de la erosión depende del uso en ingeniería, el riesgo de erosión, la pendiente y el tipo de suelo. La selección de un espaciamiento apropiado será asunto de experiencia de campo para una situación en particular y tendrá que corresponder con el presupuesto disponible [7].

A diferencia de la mayoría de las gramíneas, las raíces del vetiver crecen exclusivamente de manera vertical y alcanzan una profundidad de hasta 4 metros; con una resistencia a la tensión promedio de 75MP a $= 765\text{ kg/cm}^2$, es un excelente estabilizador de bordes y terrazas, e incrementa la resistencia al corte del suelo hasta en un 40% [8].

En esa misma línea, Castro (2013) indica que durante el tiempo de establecimiento del sistema Vetiver (SV), dado entre 4 a 8 meses en buenas condiciones, la superficie queda vulnerable, lo que resulta así en una gran desventaja. Por ello, el autor sugiere utilizar manta o malla para cubrir la superficie de interés. En ambos casos, ya sea en el uso de geo mantas o en el uso de geo mallas, la función es brindar un aporte inmediato para complementar la función del SV, el cual será muy efectivo para estabilizar el talud o controlar la erosión empero a mediano plazo [9].

Figura N° 7. Protección de ribera. Boca del monte, agosto 2011



Fuente: Combinación de Sistema Vetiver y Geomantos como técnicas de Bioingeniería

En cuanto a la revegetalización, la literatura sugiere optar por especies nativas o autóctonas. El uso de plantas herbáceas, leguminosas o los helechos como cobertura vegetal contribuyen en menor medida contra fallas traslacionales a pesar de poseer una densidad media – alta; sin embargo, las raíces de los árboles (especies leñosas) de gran longitud y diámetro mayor a 10 cm revelan una contribución importante en la resistencia al cortante del terreno.

Los muros Krainer o empalizada de troncos es una técnica compuesta por troncos paralelos y perpendiculares al río unidos mediante machimbrado y clavos, rellena posteriormente con estacas vivas o plantas enraizadas. Esta técnica permite una estabilización de riberas incluso en condiciones de fuerte erosión. Según Hernanz et al. [10], “ya se posee experiencia en diseño y ejecución de este tipo de técnicas para la estabilización de taludes en el ámbito fluvial, en la mayoría de las confederaciones hidrográficas”. Para el dimensionamiento de la estructura se deben tener en cuenta criterios geotécnicos (análisis de estabilidad global y local), hidráulicos (velocidad del agua, socavación) y estructurales (resistencia de los troncos a la flexión, corte y compresión).

Figura N° 8. Entramados de madera o muros Krainer a los 3 y 5 meses después de su construcción



Fuente: Europea de Trabajos Forestal

5.3 Factor de Seguridad Empleando Vegetación

Las investigaciones consultadas se centran en fallas traslacionales, asociadas a la presencia de estratos poco resistentes localizados a poca profundidad bajo el talud. En teoría, cuando ocurre un deslizamiento (falla), la raíz se deforma y actúa como refuerzo, lo cual genera una resistencia a la tracción y evita de tal forma su rompimiento a la vez que retarda la falla del suelo.

El incremento en la resistencia al corte causado por las raíces es función de la resistencia a la tracción de las raíces y una relación de áreas: Área efectiva de las raíces cruzada por la superficie de rotura (A_r) y Área de superficie potencial de falla o área total de la superficie de rotura (A), las cuales tienen que ver con la densidad de raíces en la superficie de rotura y la inclinación de las mismas con respecto a la superficie de rotura (β) [11]. Asimismo, Vallarino et. al (2021) indican que el aumento en la cohesión del suelo se realiza por parte de las raíces, las cuales generan un aumento en el factor de

ISSN (Digital): 2519-5719

¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?

seguridad debido a un incremento en la resistencia a tensión del talud. Estas actúan como un mecanismo similar al de los muros mecánicamente estabilizados con geo-sintéticos [12].

Los estudios revisados abarcan taludes de zona urbana y de cauces de ríos en los que se aplicaron en mayoría métodos de LEM como Morgenstern-Price, Bishop y Janbú para el análisis de estabilidad, aunque el método de Culmann también presentó resultados favorables. Para el modelamiento numérico los autores hicieron uso de softwares de ingeniería como Hec – Ras (Hydrological Engineering Center – River Analysis System) y Slide, este último en versiones vigente al año de las investigaciones. Para el modelamiento hidráulico se tuvieron en cuenta las propiedades físico-mecánicas y parámetros geotécnicos del talud, así como también parámetros geomorfológicos de la cuenca hidrográfica.

La presencia del Vetiver en el modelamiento hidráulico puede hacerse mediante el coeficiente de Manning (n), tomando en cuenta su densidad (tallos/m²), a fin de evaluar su influencia en simulaciones del río en condiciones de máximas avenidas. Así mismo, para el análisis de estabilidad, la simulación del Vetiver puede hacerse mediante anclajes del tipo Soil Nail.

Tabla N° 2. Variación del factor de seguridad empleando técnicas de bioingeniería

Técnica de Bioingeniería	Factor del Seguridad (condiciones estáticas)
Barreras con pasto Vetiver	4.05
Cobertura vegetal local (gramíneas)	1.91
Plantones de pino	1.5
Especies vegetales nativas	3.3

Fuente: Elaboración propia

5.4 Estimación de la erosión hídrica

Para la cuantificación de suelo perdido los autores emplearon el método RUSLE (Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo Revisado) y el método directo de los clavos o

varillas de erosión. Cabe destacar tres términos en torno al suelo perdido. Estos son los siguientes:

- Erosión bruta
- Erosión neta
- Suelo sedimentado

Para el método RUSLE los autores obtuvieron mapas SIG de cada zona de estudio y obtuvieron los valores R, K, L, S, C y P correspondientes, mencionados anteriormente el numeral 3.3.b), tal que al multiplicarlos obtuvieron la erosión hídrica actual y potencial.

Para el método de los clavos de erosión, los investigadores ubicaron parcelas predimensionadas de 1.50 m de ancho por 4.50 m de largo. En estas distribuyeron varillas o clavos de hierro de 3/8 a una distancia equitativa de 0.50m, marcándolas y enterrándolas a una profundidad de 20 cm y así estimar la erosión hídrica producida en un sector y durante un periodo no menos de 6 meses. Cabe destacar la investigación nacional titulada *Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana* realizada en 22 microcuencas alto andinas de 12 regiones del país.

¿Cómo la bioingeniería influye en la estabilización de laderas y en la mitigación de la erosión hídrica?

Tabla N° 3. Cuantificación y clasificación de la erosión hídrica

<i>Título de la investigación</i>	<i>Erosión hídrica (t/ha/año)</i>		
	<i>Método de clavos (parcelas)</i>	<i>Modelo RUSLE</i>	<i>Clasificación RUSLE (FAO, 1993)</i>
1. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile.	44.68	-	Moderada
	32.6	-	Moderada
2. Validación de los modelos RUSLE, WEQ y clavos de erosión en la pérdida de suelo de la microcuenca la Merced, Carchi.	642.73	297.39	Severa
		494.192	Severa
3. Estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica mediante la aplicación de la metodología USLE en la subcuenca del río Ichu.	-	655.98	Severa
4. Determinación de índices de erosión de suelos aplicando análisis SIG para la localidad de San Andrés en la provincia de Pinar del Río	-	-	Ligera / Moderada
5. Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana	45.04	-	Moderada
6. Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú	-	50	Moderada
7. Cuantificación del suelo movilizado generado por la erosión hídrica laminar mediante factores naturales, aplicando el método de clavos de erosión, en la microcuenca de San Alberto – Oxapampa – Pasco –2019	46.66	-	Moderada
8. Determinación y cuantificación de la tasa de erosión laminar en cafetales ubicados en la cuenca del río Jesús María	20	-	Ligera / Moderada
9. Cuantificación de la erosión hídrica en diferentes sistemas productivos con parcelas de escorrentía en la microcuenca Estanzuela, Esteli – Nicaragua	1.63	-	Ligera / Moderada / Severa
10. Cuantificación de la erosión hídrica superficial y pérdida de nutrientes en la degradación de suelos agrícolas, con la aplicación de dos métodos de evaluación directa, parcelas de escorrentía y microparcelas de varillas de erosión, en la microcuenca de Urambisa – Ambo – Huánuco 2015.	44.8	-	Moderada

Fuente: Elaboración propia

6. Conclusiones

Colombia es el país con mayor número de investigaciones (8) en torno a las técnicas de bioingeniería y la erosión hídrica en taludes en la región Latinoamérica, seguido por Perú (6). En el país vecino predominaron las propuestas de diseño y revisiones, mientras que las investigaciones nacionales abordaron en mayor medida la estimación de la erosión con evaluaciones con modelos matemáticos (SIG). Asimismo, el método directo de clavos de erosión fue realizado en menor medida y en territorios de cuencas en la serranía peruana.

Respecto a la variación del factor de seguridad empleando técnicas de bioingeniería, las técnicas que mayor aporte generan frente a los problemas de estudio son el sistema Vetiver y la revegetalización con especies nativas. Para condiciones estáticas, el factor de seguridad se incrementa en gran medida, superando el valor mínimo exigido de 1.50 que establece la Norma Técnica CE.020 “Estabilización de suelos y taludes”.

En cuanto a la cuantificación y clasificación de la erosión hídrica, se observa que existe una similitud en cuanto a la estimación de la erosión hídrica mediante el método de los clavos estando en el orden de 40 t/ha/año; sin embargo, mediante el modelo RUSLE los resultados no mostraron semejanza. Esto se debió a que los factores de la fórmula dependen intrínsecamente de la zona de estudio. Asimismo, según la clasificación RUSLE, el tipo de erosión hídrica se caracteriza por moderada – severa.

7. Recomendaciones

Se recomienda a los profesionales tener en cuenta las diferentes técnicas de bioingeniería como alternativas económicas y sostenibles al momento de proponer soluciones en el campo de la geotecnia, hidráulica e infraestructura vial en torno a la estabilidad de taludes y la mitigación de la erosión hídrica. Dado que en el Perú no existe manuales ni normativas en torno a la bioingeniería, se sugiere que las autoridades divulguen el tema a fin de generar un estado de conciencia en el público interesado, así como también adoptar los manuales existentes en países de Centroamérica, España o europeos de manera progresiva.

Referencias Bibliográficas

- [1] Diaz, J. S. (s/f). Estabilidad de taludes en zonas tropicales. Gov.co. https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/662_19MemExPl_373_Las_Acacias/Documento/pdf/
- [2] Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil. (s/f). Csic.es. <https://digital.csic.es/bitstream/10261/110010/1/ManualVersion-Final.pdf>
- [3] Vista de Cuantificación de la erosión hídrica en el Perú. (s/f). Edu.pe. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/view/18619/18857>
- [4] González, P. V. (2016). Especies nativas para la estabilización y restauración de taludes urbanos San Carlos Bariloche y alrededores. Obtenido de Universidad Nacional de Río Negro Repositorio Institucional: <https://rid.unrn.edu.ar/handle/20.500.12049/520>
- [5] Sobrecases, S., Ingeniero Civil, M., Geólogo, I., De Empresas, D., Especialista En Geotecnia En, T., Perú, A., Díaz, O., Sanz, R. V., Sobrecases Martí, S., & Díaz, A. (s/f). Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo. Edu.pe. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/civilizate/article/download/16157/16579>
- [6] Guías de cultivo. (s. f.). <https://www.export.com.gt/guias-de-cultivo>
- [7] Combinación de sistema Vetiver y Geomantos como Técnicas de Bioingeniería. The Vetiver Network International https://www.vetiver.org/LAICV2F/1%20Bioengineering-/B3Castro_TS.pdf
- [8] Meza, R. D. (2018). Técnicas de Bioingeniería y Biotecnología en taludes del cerro de la Picota - Huamanga - Ayacucho. Obtenido de Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga: <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2778>
- [9] Pillpa, J. N. (2019). Estabilización de taludes mediante la técnica de bioingeniería con cultivos de pastos vetiver en zonas tropicales. Obtenido de Universidad Continental - Repositorio Institucional: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/-9325/5/IV_FIN_105_TE_Sanchez_Pillpa_2019.pdf

- [10] Sánchez, R. J., & Osorio, J. P. (2017). Efectos de la vegetación en la estabilidad de laderas: una revisión. Obtenido de Universidad de Antioquia: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1095/1511>
- [11] Universidad Nacional Agraria. (2005). Programa para la Agricultura Sostenible en Laderas de América Central (PASOLAC). Obtenido de Manual de métodos sencillos para estimar erosión hídrica: https://www.researchgate.net/profile/Matilde-Somarriva-Chang/publication/259952614_Manual_de_metodos_sencillos_para_estimar_erosion_hidrica/links/0deec52eac6bcd94000000/Manual-de-metodos-sencillos-para-estimar-erosion-hidrica.pdf
- [12] Grajales Saavedra, F., Vallarino, R., Mejía, G., & Centella, D. (2021). Bioingeniería de taludes: evaluación del uso de árboles y arbustos como posible mecanismo para incrementar el factor de seguridad. Revista de Iniciación Científica, 7(2), 26–38. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v7.2.3336>
- [13] Vásquez, A., & Tapia M., M. (2011). Cuantificación de la erosión hídrica superficial en las laderas semiáridas de la Sierra Peruana. Revista Ingeniería UC, 18(3), 42-50.
- [14] Ayala, L. D. (2019). Diseño de alternativa para la estabilización de talud, empleando bioingeniería para la vía que conduce a la escuela rural de la vereda Pérdida Alta del municipio de Cimitarra Santander. Obtenido de Universidad de Cundinamarca, Repositorio Institucional: <https://repositorio.ucundinamarca.edu.co/handle/20.500.-12558/2669>
- [15] Pena, R. A., & Vega, L. L. (2016). Reforestación en zonas de riesgos de deslizamientos y sus impactos en la economía para el desarrollo sostenible de las comunidades rurales. Caso: Provincia de Manabi-Ecuador. Obtenido de Universidad Tecnológica ECOTEC, Revista: Desarrollo Local Sostenible: <https://www.eumed.net/rev/delos/26/reforestacion.html>

Gabriel Omar Carrasco Rosales

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Bachiller en Ingeniería Civil.

Autora correspondal: gabriel.carrasco@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0004-8336-1000>

Martín Diego Vargas Allca

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Bachiller en Ingeniería Civil.

martin.vargas@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0009-0001-0402-3096>

Esther Joni Vargas Chang

Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

Ingeniera Civil- Universidad Ricardo Palma. Maestra en Docencia Superior URP. Especialista en Transportes- España. Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Diplomado en Estructuras y Construcciones en Bambú URP. Diplomado en Marketing y Dirección Comercial ESEM- España. Master en Marketing y Gestión Comercial ESEM- España. Miembro Directivo de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil EPIC. Miembro del Comité de Acreditación y de Calidad EPIC - URP. Evaluadora ICACIT. Miembro Directivo del Capítulo de Ingeniería Civil 2022-2024 Consejo Departamental de Lima del Colegio de Ingenieros del Perú. Miembro de la Comisión de Transportes del CD Lima CIP.

esther.vargas@urp.edu.pe

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3500-2527>

Contribución de autoría

Gabriel Carrasco ha participado en la elaboración, la selección de los materiales abordados, el desarrollo de la perspectiva metodológica implementada, la redacción del artículo y su revisión crítica. Por su parte, Martín Vargas también ha participado en la elaboración, la selección de los materiales abordados, el desarrollo de la perspectiva metodológica implementada. Finalmente, Esther Vargas realizó la redacción del artículo, revisión crítica, conclusiones y recomendaciones de la investigación y da su aprobación a la versión que se publica.

Financiamiento

La presente investigación ha sido realizada con recursos propios de los coautores de la investigación.

Conflicto de intereses

Los autores no presentan ningún tipo de conflicto de interés.

Responsabilidad ética y legal

Los autores confirman que los datos utilizados en esta investigación son del trabajo realizado por ellos y asumen la responsabilidad ética y legal de los mismos

Correspondencia: gabriel.carrasco@urp.edu.pe