



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), septiembre-octubre 2026,
Volumen 10, Número 5.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i5

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ANIMACIÓN DIGITAL: IMPACTO EN EL MERCADO LABORAL Y LA TOMA DE DECISIONES CREATIVAS

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN DIGITAL ANIMATION:
LABOR MARKET IMPACT AND CREATIVE DECISION-
MAKING**

Jonathan Alexis Chicaiza Naranjo
Universidad San Gregorio de Portoviejo

Gema María Menendez Navarro
Universidad San Gregorio de Portoviejo

Evaluación multicriterio preliminar de técnicas de bioingeniería para el control de la erosión superficial en taludes viales de corte en Pastaza, Ecuador

Jonathan Alexis Chicaiza Naranjo¹

jachicaiza.civ@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-6026-1958>

Universidad San Gregorio de Portoviejo
Ecuador

Gema María Menendez Navarro

gmmenendez@sangregorio.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7131-2816>

Universidad San Gregorio de Portoviejo
Ecuador

RESUMEN

La erosión hídrica superficial en taludes viales de corte de la Amazonía ecuatoriana constituye un problema para la infraestructura vial por la elevada precipitación, las fuertes pendientes y la presencia de suelos residuales degradables. El objetivo de este estudio fue evaluar la viabilidad preliminar de cinco alternativas de bioingeniería para el control de la erosión superficial en taludes viales de corte de Pastaza, Ecuador. Se realizó una revisión sistemática conforme a PRISMA 2020, con 20 estudios incluidos de 498 registros identificados; se ponderaron seis criterios mediante el Proceso de Análisis Jerárquico, AHP, con un panel de siete expertos y se priorizaron las alternativas mediante Suma Ponderada Simple, SAW, complementada con un análisis de sensibilidad de 25 escenarios. El AHP asignó las mayores prioridades al desempeño técnico (27,20 %) y a la compatibilidad territorial (23,47 %). El SAW ubicó en primer lugar a las barreras vivas de vetiver, *Chrysopogon zizanioides*, seguidas por el sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación y por las biomantas biodegradables con revegetación. El vetiver mantuvo la primera posición en el 100 % de los escenarios analizados. La priorización constituye una guía preliminar y requiere validación empírica en tramos piloto antes de su aplicación ejecutiva.

Palabras clave: bioingeniería de suelos; erosión hídrica superficial; taludes viales de corte; análisis multicriterio; Pastaza.

¹ Autor principal

Correspondencia: jachicaiza.civ@gmail.com

Preliminary multicriteria evaluation of soil bioengineering techniques for surface erosion control on road cut slopes in Pastaza, Ecuador.

ABSTRACT

Surface water erosion on road cut slopes in the Ecuadorian Amazon poses a challenge to road infrastructure because of high rainfall, steep slopes, and the presence of degradable residual soils. This study aimed to evaluate the preliminary feasibility of five bioengineering alternatives for surface erosion control on road cut slopes in Pastaza, Ecuador. A systematic review following PRISMA 2020 was conducted, including 20 studies from 498 identified records; six criteria were weighted using the Analytic Hierarchy Process, AHP, with a panel of seven experts, and the alternatives were prioritized using Simple Additive Weighting, SAW, complemented by a sensitivity analysis of 25 scenarios. AHP assigned the highest priorities to technical performance (27.20%) and territorial compatibility (23.47%). SAW ranked live vetiver barriers, *Chrysopogon zizanioides*, first, followed by the combined system of surface drainage, biomat, and revegetation, and by biodegradable biomats with revegetation. Vetiver remained in first place in 100% of the scenarios analyzed. The resulting prioritization provides a preliminary guide and requires empirical validation in pilot road sections before executive implementation.

Keywords: soil bioengineering; surface water erosion; road cut slopes; multicriteria analysis; Pastaza.

*Artículo recibido 06 agosto 2026
Aceptado para publicación: 12 septiembre 2026*



INTRODUCCIÓN

La erosión hídrica superficial es un proceso de degradación frecuente en los taludes de corte de carreteras. Se genera por la acción combinada de lluvia y escorrentía en suelos expuestos y se intensifica cuando coinciden pendientes pronunciadas, materiales susceptibles y cobertura vegetal deficiente. En ambientes tropicales existe una relación inversa entre la cobertura vegetal y la producción de sedimentos, lo que respalda el uso de medidas de protección de la superficie (Ramos-Scharrón et al., 2022). La vegetación actúa mediante protección aérea y refuerzo radicular; la magnitud de estos efectos depende de la especie y su establecimiento (Lann et al., 2024). Mecanismos como la fijación de partículas por raíces, la reducción de la escorrentía y la retención de sedimentos tienen respaldo científico, aunque su efectividad varía en función del proceso erosivo y del tipo de vegetación (Dahanayake et al., 2024).

Estas condiciones son especialmente relevantes en la provincia de Pastaza. En Mera se registra una precipitación media anual cercana a 4500 mm (Vargas et al., 2022), mientras que en el corredor Puyo–Tena se documentan valores entre 3500 y 4500 mm, pendientes desde 5° hasta superiores a 70° y presencia de suelos residuales, junto con sectores de cobertura reducida (Cargua et al., 2024). Las propiedades del sustrato influyen además en el establecimiento vegetal (Guzmán et al., 2022), y a escala amazónica la pérdida de cobertura aumenta el riesgo de erosión hídrica (Martín et al., 2024).

La bioingeniería de suelos y aguas reúne soluciones que utilizan plantas vivas, partes de plantas y materiales naturales o auxiliares para controlar la erosión superficial y los movimientos de la superficie. No sustituye las medidas geotécnicas ante fallas profundas. Su transferencia entre regiones depende de la disponibilidad de especies y materiales, conocimientos técnicos, condiciones hidráulicas, mano de obra y mantenimiento (Maxwald et al., 2020). La literatura reciente muestra que estas técnicas han sido utilizadas en diferentes ambientes tropicales, aunque su nivel de evidencia varía entre territorios (Mira y Evette, 2026). En este estudio se evalúan cinco alternativas: hidrosiembra con especies adaptadas y mulch, barreras vivas de vetiver, estacas vivas o fajinas con especies locales, biomantas biodegradables con revegetación, y un sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación.

Existen antecedentes de aplicación de estas técnicas en entornos tropicales, aunque en condiciones distintas a las de Pastaza. En Ecuador se ha documentado el uso de hidrosiembra en el proyecto Mirador

(Romero Cando y Rivera Carrión, 2020). El seguimiento de largo plazo de taludes viales muestra que la cobertura vegetal evoluciona con el tiempo (Enríquez de Salamanca, 2022). El vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) ha registrado reducciones de pérdida de suelo entre 94 % y 97 % y de escorrentía cercanas al 21 % en condiciones experimentales (Aziz y Islam, 2023). Las fajinas presentan evidencia de control de erosión superficial, condicionada por el diseño y el establecimiento vegetal (Didier et al., 2026). Las estacas vivas también cuentan con experiencias de aplicación en la región (Maxwald et al., 2020). Las biomantas biodegradables han mostrado reducciones importantes de erosión en taludes tropicales, aunque a menudo combinadas con otras intervenciones (Ramos-Scharrón et al., 2022). Asimismo, se han documentado soluciones integradas de drenaje y revegetación en laderas con lluvias intensas (Hirota et al., 2025).

La heterogeneidad de climas, suelos, pendientes, escalas y periodos de seguimiento dificulta la comparación directa de estas alternativas. En la literatura revisada no se identificó una evaluación que integre, bajo una misma estructura y orientada a taludes de corte de Pastaza, el desempeño técnico, la compatibilidad territorial, la viabilidad económica, la constructibilidad, el mantenimiento y el desempeño ambiental. El vacío no radica en la ausencia de conocimiento sobre las técnicas, sino en la falta de una comparación integrada para las condiciones del territorio. Los métodos multicriterio permiten abordar este tipo de problemas. En el corredor Puyo–Tena se ha utilizado AHP para ponderar variables de susceptibilidad (Cargua et al., 2024). En otras cuencas tropicales se ha combinado con métodos de priorización de riesgo de erosión (Raji et al., 2023).

Ante esta laguna, el estudio articula la evidencia disponible mediante el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y la Suma Ponderada Simple (SAW). El objetivo es evaluar la viabilidad preliminar de las cinco alternativas de bioingeniería para el control de la erosión superficial en los taludes viales de corte de Pastaza, Ecuador.

METODOLOGÍA

Esta investigación tuvo un enfoque cuantitativo, un alcance comparativo y un carácter aplicado. Se adoptó un diseño no experimental basado en documentos, complementado con consultas estructuradas con expertos y la aplicación de métodos de toma de decisiones multicriterio. El objetivo fue comparar

preliminarmente la viabilidad de cinco alternativas de bioingeniería para el control de la erosión superficial en los taludes viales de corte de Pastaza, Ecuador.

Las unidades de análisis fueron la hidrosiembra con especies adaptadas y mulch, las barreras vivas de vetiver *Chrysopogon zizanioides*, las estacas vivas o fajinas con especies locales, las biomantas biodegradables con revegetación y el sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación. El ámbito geográfico se delimitó a la provincia de Pastaza, considerando la erosión hídrica superficial, tanto laminar como en surcos. Se excluyeron los movimientos de masa profundos y el cálculo del factor de seguridad, por requerir parámetros geotécnicos que exceden el alcance documental del estudio.

Revisión bibliográfica

La evidencia se reunió mediante una revisión estructurada según el protocolo PRISMA 2020. Las búsquedas se realizaron entre agosto y septiembre de 2026 en Scopus, Web of Science, SciELO, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar, además de repositorios institucionales ecuatorianos y documentación del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. Se identificaron 498 registros; tras eliminar duplicados y aplicar criterios de elegibilidad, se incluyeron 20 estudios. Se priorizaron las publicaciones de 2020 a 2026, admitiendo referencias metodológicas fundamentales de fechas anteriores. Se excluyeron los documentos sin metodología verificable, las publicaciones comerciales y los estudios centrados exclusivamente en la inestabilidad profunda.

La información se organizó en una matriz de extracción de evidencia con los campos mostrados en la *Tabla 1*.

Tabla 1: Estructura de la matriz de extracción de evidencia

Campo	Información registrada
Autor y año	Identificación de la fuente
País o región	Procedencia territorial del estudio
Técnica evaluada	Alternativa de bioingeniería
Condiciones del estudio	Suelo, pendiente, precipitación y otras variables relevantes
Indicador	Variable relacionada con los criterios del modelo
Resultado	Valor cuantitativo o hallazgo cualitativo reportado

Calidad metodológica	Solidez del diseño y de los métodos de medición
Transferibilidad a Pastaza	Correspondencia con las condiciones del territorio

Nota: La información no reportada en las fuentes se registró como “no reportado” y no se sustituyó por valores estimados.

La calidad metodológica y la transferibilidad se evaluaron de forma independiente del desempeño de las alternativas y no formaron parte del índice de viabilidad.

Criterios e indicadores

Se definieron seis criterios, desagregados en 19 indicadores, enlistados en la *Tabla 2*.

Tabla 2: Criterios e indicadores de evaluación

Criterio	Indicadores
Desempeño técnico	Reducción de la pérdida de suelo; control de la escorrentía superficial; rapidez de protección inicial; durabilidad de la protección; rango de pendiente aplicable
Compatibilidad territorial	Adaptación a precipitación elevada; compatibilidad con suelos residuales húmedos o sujetos a saturación; adaptación del componente vegetal a condiciones tropicales húmedas
Viabilidad económica	Costo inicial de implementación; costo de mantenimiento y reposición
Constructibilidad	Complejidad de instalación; disponibilidad de materiales, equipos y mano de obra; aplicabilidad en zonas de difícil acceso
Mantenimiento	Frecuencia de mantenimiento; complejidad de las actividades de mantenimiento; necesidad de reposición de materiales o vegetación
Desempeño ambiental	Biodegradabilidad de materiales; uso de especies nativas o adaptadas; alteración ambiental y generación de residuos

Nota: La calidad y la transferibilidad de la evidencia se evaluaron por separado y no formaron parte del índice de viabilidad.

Todos los indicadores se transformaron a una escala de favorabilidad de cinco niveles, la cual se presenta en la *Tabla 3*. La dirección de preferencia, ya fuera de beneficio o de costo, se fijó de antemano de modo

que el valor cinco representara siempre la condición más favorable. Los descriptores operativos de cada indicador se definieron antes de construir el ranking y se presentan en el material suplementario.

Tabla 3: Escala general de valoración de los indicadores

Valor	Interpretación
1	Muy desfavorable
2	Desfavorable
3	Intermedio
4	Favorable
5	Muy favorable

Nota: Cada indicador contó con descriptores operativos específicos definidos antes del cálculo del ranking.

Consulta a expertos y determinación de pesos por el método de Proceso de Análisis Jerárquico.

Los pesos de los criterios de evaluación se calcularon mediante el proceso de análisis jerárquico propuesto por Saaty (1977, 1990). Cada especialista evaluó la importancia de un criterio frente a otro utilizando la escala fundamental del uno al nueve, donde uno representa igual importancia, tres importancias moderadas, cinco importancias fuertes, siete importancias muy fuertes y nueve importancias extremas, con valores intermedios para números pares.

Se desarrolló una matriz de comparación por pares cuadrados para los criterios principales. En esta matriz, cada criterio se ha comparado con los demás, de modo que el elemento a_{ij} representa la importancia relativa del criterio i respecto al criterio j . La matriz es recíproca, es decir, $a_{ji} = 1/a_{ij}$, y los elementos de la diagonal principal son iguales a uno.

Las matrices individuales preparadas por cada especialista se consolidaron calculando la media geométrica de los juicios por pares. A partir de la matriz consolidada, se calculó el vector de prioridad utilizando el método del vector propio principal, normalizando el vector propio asociado con el valor propio más grande de la matriz. Los pesos obtenidos satisfacen la condición de que su suma sea igual a uno.

La consistencia de los juicios se evaluó mediante el índice de consistencia, definido como:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Donde $\lambda_{\max}$ es el autovalor máximo de la matriz y n es el número de criterios. Posteriormente se calculó la razón de consistencia CR :

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Siendo RI el índice aleatorio correspondiente al tamaño de la matriz. Se aceptaron únicamente aquellas matrices cuya razón de consistencia resultó igual o inferior a 0,10, valor umbral recomendado por Saaty (1990). La razón de consistencia se verificó tanto en las matrices individuales aceptadas como en la matriz grupal consolidada.

El conocimiento del trópico húmedo y la Amazonía ecuatoriana fue prioritario, así todos los participantes dieron su consentimiento informado y sus perfiles se codificaron de E1 a E7 para preservar la confidencialidad, como se detalla en la *Tabla 4*.

Tabla 4: Perfil resumido del panel de expertos

Experto	Área principal de experiencia	Años de experiencia
E1	Geotecnia y suelos residuales	14
E2	Ingeniería vial y drenaje	18
E3	Gestión ambiental y restauración de laderas	11
E4	Vegetación tropical y comportamiento radicular	15
E5	Conservación y mantenimiento vial	20
E6	Construcción vial, biomantas y drenaje	12
E7	Bioingeniería de suelos y geotecnia ambiental	16

Nota: Todos los participantes cumplieron con los criterios de selección y firmaron el consentimiento informado antes de la aplicación de las matrices de comparación por pares.

Priorización de alternativas por Suma Ponderada Simple

Con los pesos de los criterios ya definidos por el Proceso de Análisis Jerárquico, se aplicó el método de Suma Ponderada Simple propuesto por Hwang y Yoon (1981) para obtener el ranking de las alternativas. Primero se construyó la matriz de decisión, donde las filas corresponden a las cinco técnicas de bioingeniería evaluadas y las columnas a los indicadores definidos. Cada celda contiene la puntuación

de la alternativa según ese indicador, usando la escala ordinal de uno a cinco y los descriptores operativos ya establecidos.

Como el Proceso de Análisis Jerárquico entrega pesos a nivel de criterios, y el método de Suma Ponderada Simple trabaja a nivel de indicadores, el peso de cada criterio se repartió de forma equitativa entre sus indicadores. Es decir, si un criterio obtuvo un peso W_c y contiene k indicadores, cada indicador de ese criterio recibió un peso:

$$w_j = \frac{W_c}{k}$$

De este modo, la suma de todos los pesos de indicadores da uno, y se conserva la importancia relativa que los expertos le dieron a cada criterio.

Todas las puntuaciones entraron a la matriz de decisión en escala de uno a cinco, donde el valor cinco representa siempre el desempeño más favorable. Debido a que la orientación de los indicadores de costo y beneficio ya había sido incorporada durante la operacionalización, las puntuaciones se transformaron a una escala común de cero a uno mediante una normalización lineal basada en los extremos fijos de la escala:

$$r_{ij} = \frac{s_{ij} - 1}{4}$$

donde s_{ij} corresponde a la puntuación original de la alternativa i en el indicador j , y r_{ij} a su valor normalizado. De esta manera, las puntuaciones 1, 2, 3, 4 y 5 correspondieron, respectivamente, a 0; 0,25; 0,50; 0,75 y 1.

La puntuación global de cada alternativa se calculó mediante la expresión:

$$V_i = \sum_j w_j \cdot r_{ij}$$

donde V_i es la puntuación global de la alternativa i , w_j es el peso del indicador j y r_{ij} es el valor normalizado correspondiente. Con esa puntuación, las cinco alternativas se ordenaron de mayor a menor según su puntuación global. La alternativa con el mayor valor de V_i se identificó como la de mayor viabilidad preliminar para el control de la erosión superficial en taludes viales de corte de Pastaza, Ecuador, bajo los criterios, indicadores y condiciones considerados en el estudio.

Análisis de sensibilidad

Para evaluar la robustez de la priorización obtenida, se realizó un análisis de sensibilidad tomando como referencia el escenario base definido por los pesos obtenidos mediante AHP. El peso de cada criterio se modificó individualmente en más y menos el 10 % y en más y menos el 20 %, manteniendo constantes las valoraciones de desempeño de las alternativas.

Para cada variación, el peso modificado del criterio (c) se calculó como:

$$Wc' = Wc(1 + \delta)$$

Donde W_c corresponde al peso original del criterio y (δ) tomó los valores $-0,20$, $-0,10$, $0,10$ y $0,20$.

Los pesos de los criterios restantes se redistribuyeron proporcionalmente para conservar la condición de suma unitaria:

$$W'_h = W_h \left(\frac{1 - W'_c}{1 - W_c} \right), \quad h \neq c$$

Después de cada modificación se recalcularon los pesos de los indicadores y las puntuaciones globales de las cinco alternativas mediante SAW.

Como escenario complementario se evaluó una distribución de pesos iguales entre los seis criterios:

$$W'_c = \frac{1}{6}$$

La robustez de la priorización se examinó comparando los cambios en las puntuaciones globales y en el orden de las alternativas respecto al escenario base.

Alcance y limitaciones

El estudio corresponde a una valoración comparativa preliminar basada en evidencia documental y juicio experto. Los resultados permiten establecer un orden de prioridad entre las cinco alternativas de bioingeniería analizadas, pero no constituyen una validación experimental para un talud específico. La aplicación de cualquiera de estas alternativas en el campo requiere una caracterización geotécnica, hidráulica y ambiental del sitio, así como el diseño correspondiente a las condiciones particulares de la intervención.

Entre las principales limitaciones se encuentra la escasez de pruebas realizadas específicamente en taludes viales de corte de Pastaza. Gran parte de la evidencia proviene de modelos experimentales,

estudios de otros territorios tropicales o experiencias aplicadas en diferentes condiciones. Además, existe heterogeneidad en los indicadores y formas de reporte de los estudios examinados, y no fue posible establecer una base monetaria homogénea en los costos unitarios locales. Por estas razones, la priorización obtenida debe interpretarse como una herramienta de apoyo a la decisión y no como una recomendación final de implementación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización territorial de taludes de corte en Pastaza

Los taludes viales de corte de Pastaza se caracterizan por un clima con abundante agua disponible, pendientes pronunciadas, suelos residuales y las limitaciones operativas típicas de una carretera amazónica. Este conjunto de condiciones fue el marco con el que se evaluó la compatibilidad eran las alternativas de bioingeniería.

La precipitación constituye un factor determinante en este contexto. En Mera se reportó un promedio anual de alrededor de 4500 mm, distribuidos durante la mayor parte del año (Vargas et al., 2022), y en el corredor Puyo-Tena, que comprende sectores de Pastaza y Napo, se han documentado precipitaciones anuales de entre 3500 y 4500 mm (Cargua et al., 2024). En conjunto, estos antecedentes describen un ambiente de elevada disponibilidad de humedad, donde controlar y conducir la escorrentía superficial resulta determinante para proteger las superficies viales expuestas.

En cuanto al suelo, la evidencia territorial indica que en los sectores del corredor amazónico analizados existen suelos residuales y litologías porosas. La combinación de alta humedad, materiales fácilmente saturables y superficies expuestas hace que los suelos intervenidos sean más propensos al desprendimiento y arrastre de partículas. Por este motivo, el carácter húmedo o saturable del sustrato se incorporó al modelo multicriterio como variable de compatibilidad territorial.

La topografía también mostró variabilidad importante. En el corredor Puyo-Tena se han registrado pendientes desde aproximadamente 5° hasta valores superiores a 70°, con sectores de fuerte inclinación asociados a mayores condiciones de susceptibilidad (Cargua et al., 2024). Estos valores no se interpretaron como una geometría representativa de todos los taludes de Pastaza, sino como evidencia de que existen sectores viales con pendientes pronunciadas dentro del contexto territorial de referencia.

Otro factor es la pérdida de cobertura vegetal cuando se abre un corte de carretera. Con la superficie expuesta, la vegetación deja de amortiguar el impacto de la lluvia y el suelo se vuelve más propenso a la erosión hídrica. Para la Amazonía ecuatoriana, la evidencia regional indica que el cambio en la cobertura terrestre influye en gran medida en la dinámica de esta erosión (Martín et al., 2024).

A las condiciones del territorio se suman restricciones operativas. Según la documentación técnica revisada, el difícil acceso, el transporte de materiales, la escasez de maquinaria especializada y los requisitos de mantenimiento pueden limitar lo que se logra en la infraestructura vial amazónica (MTOP, 2013). Estas limitaciones se reflejaron en indicadores de disponibilidad de recursos, aplicabilidad en áreas de difícil acceso y requisitos de mantenimiento.

La caracterización dejó cuatro condiciones que pesaron en la evaluación: alta precipitación, suelos húmedos o saturados, pendientes pronunciadas y limitaciones logísticas para construir y mantener. Ninguno se usó para favorecer una alternativa de antemano. Sirvieron como referencia territorial para juzgar hasta qué punto las pruebas recopiladas son transferibles a Pastaza.

Resultados de la revisión de la literatura

La revisión bibliográfica permitió reunir la evidencia que sustentó la comparación de las alternativas. La búsqueda se desarrolló entre el 5 de agosto y el 12 de septiembre de 2026 e incluyó Scopus, Web of Science, SciELO, ScienceDirect, SpringerLink y Google Scholar, además de repositorios institucionales ecuatorianos y documentación técnica del Ministerio de Transporte y Obras Públicas. El proceso de identificación, selección y evaluación de las fuentes se organizó siguiendo un flujo adaptado de PRISMA 2020.

La búsqueda inicial arrojó 498 registros. Al quitar 65 duplicados quedaron 433 registros únicos, que se revisaron por título y resumen. En esa etapa se descartaron 358 y pasaron 75 a la fase de recuperación de texto completo, aunque nueve de ellos no se pudieron obtener. Los otros 66 se leyeron completos y 46 fueron excluidos. El corpus definitivo quedó en 20 documentos. La Tabla 6 resume el proceso.

Tabla 5: Resumen del proceso de selección documental

Etapa del proceso	N.º
Registros identificados	498
Duplicados eliminados	65
Registros revisados por título y resumen	433
Registros excluidos durante el cribado	358
Documentos seleccionados para recuperación a texto completo	75
Textos completos no recuperados	9
Textos completos evaluados para elegibilidad	66
Documentos excluidos tras la evaluación a texto completo	46
Documentos incluidos finalmente	20

Nota: Proceso de selección de documentales adaptado de PRISMA 2020.

Casi todos los descartes ocurrieron al revisar títulos y resúmenes, la lectura completa sirvió para una segunda selección, en la que se examinó con más detalle la relevancia técnica, si el documento aportaba información útil y si sus resultados podían transferirse en el contexto de Pastaza.

Los 20 artículos no desempeñaron el mismo papel dentro del estudio. Algunos han proporcionado resultados directos sobre cómo se comportan las técnicas de bioingeniería. Otros ayudaron a comprender los aspectos constructivos, ambientales o de mantenimiento. También se incluyeron fuentes territoriales para describir las condiciones de Pastaza y las referencias metodológicas con las que se estructuraron la revisión y análisis multicriterio.

La evidencia técnica presentó una diversidad importante, para barreras vivas de vetiver existen estudios experimentales que midieron la pérdida y escorrentía del suelo. Las fajinas y otras técnicas con material vegetal vivo se basan principalmente en revisiones especializadas y experiencia en la aplicación. Las biomantas cuentan con datos de campo sobre pendientes de corte del clima tropical, y las soluciones que combinan drenaje con revegetación tienen experiencias técnicas desarrolladas bajo fuertes lluvias. Así, las particularidades de cada estudio se mantuvieron en la matriz de evidencia, y no todos los resultados se trataron como equivalentes.

Ponderación relativa de los criterios

Los pesos se obtuvieron a partir de las matrices de comparación por pares completadas por los siete especialistas del panel. Cada uno hizo 15 comparaciones entre los seis criterios principales, que arrojaron 105 juicios individuales. Las siete matrices cumplieron con el criterio de consistencia: la razón de consistencia osciló entre 0,0059 y 0,0234, por lo que no hubo que descartar ninguna respuesta. La matriz de grupo tenía una relación de 0,0028, muy por debajo del umbral de 0,10.

La agregación de los juicios ubicó al desempeño técnico en primer lugar con un 27,20%, seguido de la compatibilidad territorial con un 23,47%. Entre los dos suponen el 50,67% del peso total. Le siguen el mantenimiento (15,05%), el desempeño ambiental (14,22%) y la constructibilidad (12,34%). La viabilidad económica recibió el menor peso, 7,71%. La Tabla 6 resume estos resultados.

Tabla 6: Jerarquía y pesos de los criterios obtenidos mediante el Proceso de Análisis Jerárquico

Jerarquía	Criterio	Peso	Porcentaje
1	Desempeño técnico	0,2720	27,20 %
2	Compatibilidad territorial	0,2347	23,47 %
3	Mantenimiento	0,1505	15,05 %
4	Desempeño ambiental	0,1422	14,22 %
5	Constructibilidad	0,1234	12,34 %
6	Viabilidad económica	0,0771	7,71 %
Total	---	1,00	100,00 %

Nota: Elaboración propia a partir de los juicios consolidados del grupo de expertos.

El panel le dio mayor importancia a la capacidad técnica de alternativas y que se adapten a las condiciones territoriales de Pastaza. Aun así, la decisión no dependió solo de estas dos dimensiones. El mantenimiento y el desempeño ambiental en conjunto aportan aproximadamente un tercio más que el peso del modelo, y la constructibilidad y la viabilidad económica, aunque con menos peso, siguen estando explícitamente presentes en la evaluación.

Ranking de alternativas

Con las ponderaciones finales se armó la matriz de decisión de las cinco alternativas y 19 indicadores. Las puntuaciones se expresaron en una escala de favorabilidad ordinal del 1 al 5. El peso de cada criterio se distribuyó equitativamente entre sus indicadores, y las puntuaciones se normalizaron en una escala de 0 a 1 antes de la agregación ponderada. La *Tabla 7* muestra las puntuaciones generales y el orden resultante.

Tabla 7: Ranking final de las alternativas en el escenario base

Posición	Alternativa	Puntuación global	Diferencia respecto a la anterior
1	Barreras vivas de vetiver	0,7619	—
2	Sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación	0,7399	0,0220
3	Biomantas biodegradables con revegetación	0,7332	0,0066
4	Estacas vivas o fajinas con especies locales	0,7107	0,0225
5	Hidrosiembra con especies adaptadas y mulch	0,6794	0,0314

Nota: Elaboración propia en base a las puntuaciones obtenidas con el método de Suma Ponderada Simple.

Las barreras vivas de vetiver ocuparon la primera posición. Su resultado no se explica por una ventaja absoluta en todos los indicadores, sino por un desempeño relativamente equilibrado entre las distintas dimensiones del modelo: obtuvo buenas calificaciones en términos de reducción de pérdidas de suelo, durabilidad, compatibilidad territorial, constructibilidad, mantenimiento y desempeño ambiental. Su punto más débil es la rapidez de protección inicial, ya que el sistema vegetal necesita un período de establecimiento antes de cumplir plenamente con su función.

El sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación quedó en segundo lugar. Obtuvo las mayores contribuciones en desempeño técnico y compatibilidad territorial, que son precisamente los dos criterios con mayor peso. Esa ventaja fue parcialmente compensada por valoraciones más bajas en términos de costo inicial, complejidad de construcción y aplicabilidad en áreas de difícil acceso.



Las biomantas biodegradables con revegetación quedaron en tercer lugar, solo 0,0066 puntos por detrás del sistema combinado. Se distinguieron por la rapidez de protección otorgada por la cobertura física y su desempeño ambiental. Sus evaluaciones fueron más moderadas en términos de control de escorrentía, viabilidad económica y constructibilidad.

Las estacas vivas o fajinas con especies locales ocuparon el cuarto lugar. Su principal fortaleza se asoció con el desempeño ambiental y la adaptación del componente de la planta, mientras que la velocidad de protección, el rango de pendiente, el costo y el mantenimiento, con calificaciones más modestas, redujeron su puntaje agregado.

La hidrosiembra con especies adaptadas y *mulch* obtuvo la menor puntuación del grupo, mantuvo un comportamiento favorable en adaptación del componente vegetal y desempeño ambiental, pero sus valoraciones comparativamente menores en control de escorrentía, durabilidad y adaptación a precipitación elevada limitaron su posición relativa.

Las diferencias entre los tres primeros son pequeñas, es decir, que la clasificación sirve como una prioridad comparativa basada en los criterios y ponderaciones utilizados, y no como evidencia de que una técnica sea absolutamente mejor que las otras.

Solidez del ranking

Se evaluaron 25 escenarios alternativos. En 24 de ellos, cada criterio se modificó por separado en más y menos el 10 % y en más y menos el 20 %; el restante fue un escenario con iguales ponderaciones para los seis criterios.

Las barreras vivas del vetiver se mantuvieron en primer lugar en todos los escenarios, con puntajes que oscilaron entre 0,7595 y 0,7642. Se produjeron cambios en los siguientes puestos. Al reducir el peso del desempeño técnico o la compatibilidad territorial, las biomantas cambiaron al sistema combinado y ocuparon el segundo lugar. El escenario de ponderaciones iguales fue el que más alteró el orden, ya que condujo al sistema combinado hacia el final de la clasificación.

Aunque el vetiver retuvo el primer lugar en todos los casos, su ventaja sobre el sistema combinado se redujo significativamente cuando el peso del desempeño técnico aumentó en un 20%, hasta aproximadamente 0,0017 puntos. La primera posición es estable dentro del rango analizado, pero esto

no garantiza una amplia separación de todas las alternativas con alguna estructura de preferencia. La clasificación completa del escenario base se mantuvo en 20 de los 25 escenarios, es decir, en el 80%.

Interpretación a la luz de la evidencia disponible

El buen resultado del vetiver concuerda con la evidencia experimental. Aziz e Islam (2023) informaron reducciones en la pérdida de suelo entre el 94% y el 97% y una disminución promedio en la escorrentía cercana al 21% en modelos físicos de 37°. Estos valores respaldan altas evaluaciones de los indicadores de desempeño técnico. Sin embargo, provienen de condiciones experimentales específicas y no validan directamente el comportamiento en las laderas de Pastaza.

Esta precaución pesa más debido a las condiciones del área de estudio. En Mera, la precipitación media anual se reporta cercana a los 4500 mm (Vargas et al., 2022). En el corredor Puyo-Tena se documentan valores de 3500 a 4500 mm, suelos residuales y sectores con pendientes que pueden superar los 70° (Cargua et al., 2024). Además, el resultado de cualquier técnica de bioingeniería depende de factores locales: el tipo de suelo, la dinámica de escorrentía, el establecimiento de vegetación y la disponibilidad de materiales y mano de obra (Maxwald et al., 2020). Así, el primer lugar del vetiver indica una mayor viabilidad comparativa dentro del modelo, y no una recomendación automática para ningún talud de la provincia.

Las barreras de vetiver son más adecuadas cuando el problema es la erosión superficial o los procesos superficiales y el suelo permite que la vegetación se asiente. No reemplazan las medidas de estabilización necesarias si existen mecanismos de falla profunda. Antes de aplicarlas en un sitio específico, es aconsejable verificar la estabilidad general de la pendiente, las propiedades del suelo residual y si hay flujos concentrados que requieran obras de drenaje complementarias.

El sistema combinado obtuvo la puntuación más alta en términos de desempeño técnico y alta compatibilidad territorial, pero quedó en segundo lugar. Su lógica funcional es clara: el drenaje intercepta y conduce el agua, la biomanta ofrece protección física inicial y la vegetación se forma con el tiempo. Su menor puntuación general se debe principalmente a una mayor demanda económica y constructiva. La literatura apoya conceptualmente la combinación del manejo hidráulico con la revegetación en laderas con fuertes lluvias (Hirota et al., 2025), pero la configuración evaluada no tiene validación específica en Pastaza.



Las biomantas biodegradables ocuparon en tercer lugar, con un rendimiento muy cercano al del sistema combinado. Su principal ventaja es la protección física inmediata mientras la vegetación aún no está establecida. Ramos-Scharrón et al. (2022) documentaron reducciones significativas en la erosión al combinar coberturas orgánicas con vegetación en laderas tropicales, aunque en varios casos también se ha modificado la pendiente, lo que evita que se aísle el efecto de biomanta por sí solo.

Las estacas vivas o fajinas y la hidrosiembra ocuparon el cuarto y quinto lugar, respectivamente, lo que no significa que sean inútiles. Las estacas y fajinas tienen ventajas ligadas al uso de material vegetal local, aunque con evidencia heterogénea (Didier et al., 2026). La hidrosiembra cuenta con experiencia en ambientes tropicales húmedos del suroriente ecuatoriano (Romero Cando y Rivera Carrión, 2020), pero el principal antecedente corresponde a superficies mineras y no a taludes viales de corte en Pastaza.

Implicaciones para la gestión vial en Pastaza

Los resultados indican que, para elegir una técnica de bioingeniería en Pastaza, no debería basarse únicamente en cuánto suelo protege. Influyen la precipitación, la pendiente, las características del suelo residual, la necesidad de protección rápida, la disponibilidad de materiales, la complejidad constructiva y el mantenimiento. Es por eso que el vetiver ocupó la primera posición con un perfil uniforme, mientras que el sistema combinado, a pesar de ser el mejor en términos de desempeño técnico, perdió parte de su ventaja al incorporar los criterios económicos y operativos.

El estudio clasifica la evidencia de contextos muy diferentes en una única estructura de comparación diseñada para Pastaza. Esto deja de describir cada técnica por separado y pasa a una evaluación donde se ven los criterios de decisión y las razones de cada posición. Para quienes diseñan, construyen o mantienen las carreteras de la provincia, el modelo brinda información útil, aunque no reemplaza el estudio que necesita cada pendiente por sí solo.

Las limitaciones determinan cómo leer estos resultados, la principal es la escasez de ensayos de campo realizados específicamente en taludes viales de corte de Pastaza. Gran parte de la evidencia proviene de modelos experimentales, estudios de otros territorios tropicales o experiencias aplicadas bajo condiciones distintas. Además, los estudios examinados no utilizan los mismos indicadores ni informan de la misma manera, y no fue posible establecer una base monetaria común para comparar costos en

condiciones locales equivalentes. Es por ello que la evaluación económica se basó en categorías ordinales y el juicio estructurado del grupo de expertos.

Por estas razones, la priorización obtenida constituye una evaluación preliminar de apoyo a la toma de decisiones. Identifica alternativas que merecen examinarse con mayor profundidad, pero no reemplaza los estudios de detalle. La validación mediante ensayos de campo permitirá comprobar si las diferencias observadas se mantienen bajo las condiciones reales de precipitación, suelo, pendiente y operación vial de Pastaza.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se sostiene que la elección de una técnica de bioingeniería para taludes viales de corte de Pastaza no debería depender solo de cuánto reduce la erosión superficial. La combinación de lluvias abundantes, suelos residuales fácilmente saturados, pendientes pronunciadas y los límites del territorio requiere una evaluación integrada, donde el desempeño técnico se acompañe de compatibilidad territorial, constructibilidad, mantenimiento e impacto ambiental.

En este contexto, las barreras vivas de vetiver siguieron siendo la alternativa con mayor viabilidad preliminar. Esto se explica por un desempeño relativamente uniforme entre las diferentes dimensiones evaluadas, no porque fuera superior en todos los indicadores por igual. El sistema combinado de drenaje superficial, biomanta y revegetación, junto con biomantas biodegradables con revegetación, obtuvieron puntuaciones cercanas a las del vetiver, lo que sugiere que este orden funciona más como una guía comparativa que como una jerarquía cerrada de aplicación.

Que el vetiver permanezca en primer lugar incluso variando los pesos da consistencia al resultado principal. Sin embargo, los siguientes puestos se mueven cuando cambian las preferencias asignadas a los criterios técnicos, territoriales o ambientales, y esto nos obliga a leer detenidamente el ranking, pensando siempre en las condiciones particulares de cada sitio. Por lo tanto, la aplicación de cualquiera de las alternativas mejor ubicadas requiere primero revisar la pendiente, las propiedades del suelo, el régimen de escorrentía, la disponibilidad de material de siembra y las condiciones de acceso y mantenimiento del sitio específico.

Vale la pena señalar que estos resultados hablan del control de la erosión superficial y los procesos superficiales, no de la estabilidad geotécnica profunda. Aún falta validación empírica en las secciones



piloto, en las condiciones reales de Pastaza. Esta fase mostrará si las diferencias mostradas por el modelo multicriterio se mantienen en campo y brindará información para afinar la selección de medidas de control de la erosión en la infraestructura vial de la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aziz, S., y Islam, M. S. (2023). Erosion and runoff reduction potential of vetiver grass for hill slopes: A physical model study. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.08.005>
- Cargua, C. J., Espin, R., Valencia, B. G., Simbaña, M., Araujo, S., Ocampos, A., y Cornejo, C. (2024). Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera Amazónica del Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 39(1), 117–138. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07>
- Dahanayake, A. C., Webb, J. A., Greet, J., y Brookes, J. D. (2024). How do plants reduce erosion? An Eco Evidence assessment. *Plant Ecology*, 225, 593–604. <https://doi.org/10.1007/s11258-024-01414-9>
- Didier, M., Evette, J.-B., Leblois, S., Jaymond, D., Raymond, P., Frossard, P.-A., Vivier, A., Mira, E., Schmitt, E., y Evette, A. (2026). An ancestral nature-based solution: A review of fascines in soil and water bioengineering. *Journal of Environmental Management*, 415, 130609. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.130609>
- Enríquez-de-Salamanca, Á. (2022). Vegetation change in road slopes in the Mediterranean region over 25 years. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 30(1), 94–105. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.16324>
- Guzmán, P., Benítez, Á., Carrión-Paladines, V., Salinas, P., y Cumbicus, N. (2022). Elevation and soil properties determine community composition, but not vascular plant richness in tropical Andean roadside. *Forests*, 13(5), 685. <https://doi.org/10.3390/f13050685>
- Hirota, K., Wangdi, G., Yezer, S., Dahal, H.-M., y Nishimura, T. (2025). Design ways of vegetation work and drainage system for bioengineering on the landslide slope at Gopini in Bhutan. In B. Abolmasov, I. Alcántara-Ayala, Ž. Arbanas, K. Konagai, M. Mikoš, K. Sassa, S. Sassa, B.



- Tiwari, y V. Tofani (Eds.), *Progress in Landslide Research and Technology, Volume 4 Issue 1*, 2025 (pp. 267–291). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-89836-5_16
- Hwang, C.-L., y Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications: A state-of-the-art survey* (Vol. 186). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>
- Lann, T., Bao, H., Lan, H., Zheng, H., Yan, C., y Peng, J. (2024). Hydro-mechanical effects of vegetation on slope stability: A review. *Science of the Total Environment*, 926, 171691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171691>
- Martín, J., Baumann, J., Muyulema, W., Calahorrano, O., y da Silva, M. (2024). Monitoreo espacio-temporal de la erosión hídrica en la cuenca de la Amazonía ecuatoriana. *Siembra*, 11(3 Especial), e5560. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/SIEMBRA/article/view/5560>
- Maxwald, M., Crocetti, C., Ferrari, R., Petrone, A., Rauch, H. P., y Preti, F. (2020). Soil and water bioengineering applications in Central and South America: A transferability analysis. *Sustainability*, 12(24), 10505. <https://doi.org/10.3390/su122410505>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas del Ecuador. (2013). *Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 – Volumen N.º 6: Conservación vial*. MTOP.
- Mira, E., y Evette, A. (2026). An overview of soil and water bioengineering as a nature-based solution for erosion and substrate mass movement control in the tropics. *Ecological Engineering*, 227, 107951. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2026.107951>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pozo Villacís, C. P. (2021). *Análisis de estabilidad de taludes de una extensión de 260 metros en la vía Papallacta Baeza, sector Cuyuja* [Trabajo de titulación de grado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21881>
- Raji, S. A., Akintuyi, A. O., Wunude, E. O., y Fashoto, B. (2023). Coupling MCDM-based ensemble and AHP for the sustainable management of erosion risk in a tropical Sub-Saharan basin.

Watershed Ecology and the Environment, 5, 186–208.
<https://doi.org/10.1016/j.wsee.2023.08.001>.

- Ramos-Scharrón, C. E., Alicea-Díaz, E. E., Figueroa-Sánchez, Y. A., y Viqueira-Ríos, R. (2022). Road cutslope erosion and control treatments in an actively-cultivated tropical montane setting. *Catena*, 209, 105814. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105814>
- Romero Cando, J., y Rivera Carrión, A. (2020). La hidrosiembra, técnica de bioingeniería para la restauración de suelos producto de actividades mineras: experiencia en el proyecto minero Mirador, Zamora Chinchipe - Ecuador. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(1), 11–21.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234–281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L. (1990). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. RWS Publications.
- Suárez Díaz, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Ediciones UIS.
- Vargas, D., Chimborazo, O., László, E., Temovski, M., y Palcsu, L. (2022). Rainwater isotopic composition in the Ecuadorian Andes and Amazon reflects cross-equatorial flow seasonality. *Water*, 14(13), 2121. <https://doi.org/10.3390/w14132121>

