

Índice de integridad del suelo en un muro de contención con gaviones

Soil integrity index in a gabion retaining wall

D. E. Estrada-Hernández¹ , J. E. Cerón-Carballo² , H. I. Navarro-Gómez² * 
(*humberto_navarro@uaeh.edu.mx)

Recibido: 06 de julio de 2025 Aceptado: 30 de octubre de 2025

RESUMEN

Este estudio evaluó la estabilidad de un muro de contención con gaviones ubicado en la Carretera Federal México 105, en el estado de Hidalgo, tramo clave del corredor México–Pachuca–Tampico. El objetivo fue determinar la condición actual del muro y estimar un Índice de Integridad del Suelo (IIS) como indicador del grado de compactación, cohesión y resistencia frente a procesos erosivos. La metodología integró levantamientos topográficos, inspección visual y fotográfica, así como exploraciones geotécnicas en cinco estaciones (profundidades de 4–8 m). Se obtuvieron valores de densidad natural (1 480–1 620 kg/m³), ángulo de fricción interna (26°–30°) y capacidad de carga admisible (7–12 kg/cm²). Estos parámetros se incorporaron al cálculo del IIS junto con un factor de erosión. Los resultados muestran que el tramo inicial (0+000 a 0+020) conserva estabilidad estructural adecuada, mientras que en el cadenamiento 0+030 se detectó erosión activa, pérdida de compactación y reducción del IIS hasta un 85 % respecto a la condición de referencia (2015 = 100 %). Se concluye que la falta de extensión del muro en dicho punto genera un riesgo crítico, recomendándose ampliar la estructura, reforzar el drenaje y aplicar técnicas de estabilización y revegetación. El IIS se plantea como herramienta práctica para monitorear la integridad de taludes carreteros.

Palabras clave: gaviones, geotecnia, integridad estructural, suelo, contención

¹Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

²Ingeniería Civil Forense, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.



ABSTRACT

This study evaluated the stability of a gabion retaining wall located on Federal Highway Mexico 105 in the state of Hidalgo, a key section of the Mexico–Pachuca–Tampico corridor. The objective was to determine the current condition of the wall and estimate a Soil Integrity Index (SII) as an indicator of the degree of compaction, cohesion, and resistance to erosion. The methodology integrated topographic surveys, visual and photographic inspection, and geotechnical explorations at five stations (depths of 4–8 m). Values were obtained for natural density (1480–1620 kg/m³), internal friction angle (26°–30°), and allowable bearing capacity (7–12 kg/cm²). These parameters were incorporated into the IIS calculation along with an erosion factor. The results show that the initial section (0+000 to 0+020) maintains adequate structural stability, while in the 0+030 chain, active erosion, loss of compaction, and a reduction in the IIS of up to 85 % compared to the reference condition (2015 = 100 %) were detected. It is concluded that the lack of wall extension at this point poses a critical risk, and it is recommended to expand the structure, reinforce drainage, and apply stabilization and revegetation techniques. The IIS is proposed as a practical tool for monitoring the integrity of road slopes.

Keywords: *gabions, geotechnics, structural integrity, soil, containment*

INTRODUCCIÓN

Los muros de contención con gaviones se utilizan ampliamente en obras de infraestructura vial debido a su bajo costo, facilidad constructiva, capacidad de drenaje y adaptación a diferentes perfiles topográficos. Estas estructuras, conformadas por cestas metálicas rellenas de piedra, ofrecen una solución eficaz frente a procesos de erosión y deslizamientos, especialmente en zonas montañosas y con suelos inestables. La Carretera Federal 105, parte del corredor México–Pachuca–Tampico, constituye un eje estratégico de comunicación entre el centro y el norte del país. Debido a su tránsito constante y a la compleja topografía que atraviesa, ha requerido la construcción de diversas obras de contención para garantizar la seguridad vial. No obstante, algunos tramos presentan fallas asociadas a erosión, escorrentía superficial y pérdida progresiva de compactación en los suelos de soporte, lo que compromete la estabilidad de la vía. Ante este escenario, se plantea la necesidad de contar con indicadores que permitan diagnosticar y monitorear de manera preventiva el estado de los suelos en interacción con estructuras de contención. En este trabajo se propone y aplica un Índice de Integridad del Suelo (IIS) como parámetro compuesto que integra densidad, fricción interna, capacidad de carga y erosión, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del terreno y anticipar posibles fallas. El presente estudio analiza un muro de gaviones en el estado de Hidalgo, describiendo su condición actual, las características del suelo circundante y las implicaciones de los procesos erosivos detectados en un tramo crítico.

Marco Conceptual

Los muros de contención con gaviones son estructuras modulares conformadas por cestas metálicas rellenas de roca, que se utilizan ampliamente en la ingeniería civil. Su diseño aprovecha tanto el peso propio del material pétreo como la flexibilidad de la malla metálica, lo que permite adaptarse a movimientos diferenciales del terreno y disipar energía hidráulica. La estabilidad geotécnica de taludes de un muro de contención depende directamente de las propiedades mecánicas del suelo, entre las que destacan la densidad natural, el ángulo de fricción interna y la capacidad de carga admisible. El Índice de Integridad del Suelo (IIS) se plantea como un parámetro compuesto que integra variables geotécnicas y factores de erosión para diagnosticar el estado de los suelos en interacción con estructuras de gaviones.

Zona de estudio

La Figura 1 muestra el muro de contención de gaviones en su sección principal. Se observan cinco niveles de módulos, dispuestos de forma escalonada en una pendiente inclinada. La estructura cumple la función de contención del terreno adyacente a la carretera, estabilizando el talud natural y protegiendo la carretera contra deslizamientos. Su construcción de piedra de la región permite el drenaje natural del agua, reduciendo la presión hidrostática detrás de la pared. Se observa una falla o erosión localizada en el extremo derecho del muro, donde no se ha continuado la contención.



FIGURA 1. *Imagen del arreglo del muro de gaviones.*

El muro de contención está conformado por gaviones apilados en módulos rectangulares que varían en altura según el cadenamamiento. Desde 0+000 hasta 0+015, la estructura mantiene una configuración uniforme de cinco niveles, lo que garantiza estabilidad frente a los empujes laterales del terreno. Del 0+015 al 0+020, la altura se reduce a cuatro niveles, indicando un ajuste de diseño para adaptarse a la topografía descendente. Se puede ver una zona crítica de erosión situada al final de la muralla, donde el sistema de gaviones no se extendía. Esta omisión ha dejado el talud expuesto a la escorrentía superficial, generando un proceso de degradación progresiva del terreno. La distribución vertical de los gaviones

constituye un factor clave en la estabilidad global del muro y en la interpretación del Índice de Integridad del Suelo (IIS) [1].

Marco Referencial

Chairullah *et al.* [2] evaluaron la estabilidad de taludes reforzados mediante la combinación de muros de gaviones y pilotes de concreto, comparando escenarios sin refuerzo y con refuerzo mediante modelación numérica en PLAXIS 2D para distintos ángulos de pendiente (45°, 60°, 70° y 90°); sus resultados muestran incrementos relevantes del Factor de Seguridad (SF), particularmente en pendientes pronunciadas, al incorporar el sistema gavión–pilotes, lo que respalda que refuerzos complementarios al gavión pueden mitigar mecanismos de inestabilidad profunda y se alinea con el uso del IIS para identificar cadenamientos críticos.

Este trabajo sustenta la hipótesis de que estructuras complementarias al gavión pueden reducir riesgos estructurales profundos, lo cual se alinea con tu uso del IIS para identificar zonas críticas en los cadenamientos [2].

May Than Thar Cho *et al.* [3] estudiaron, mediante ensayos de modelos físicos 1g, la efectividad de gaviones filtrantes colocados en la base del talud para reducir desplazamientos y retrasar la aparición de fallas superficiales bajo lluvia intensa; además, evaluaron variantes como la incorporación de tuberías de drenaje, el diámetro y la profundidad de inserción del tubo, y la evolución de la superficie freática. Estos hallazgos sustentan la relevancia del diseño adecuado del drenaje y del sistema de gaviones filtrantes para mantener la estabilidad, lo que respalda la incorporación del IIS para ponderar el impacto del drenaje y la erosión.

En contextos de soluciones con gaviones de bajo costo para su adopción en países en desarrollo, se ha documentado estabilidad adecuada a partir de investigaciones de campo y laboratorio [4].

DIMENSIONES ESTÁNDAR

La Tabla 1, muestra las dimensiones de fabricación de los módulos los gaviones, dependiendo de los requerimientos estructurales y del diseño del muro de contención.

Las cestas están compuestas por malla metálica de acero galvanizado o recubierto, y su volumen final depende del largo, ancho y alto de cada unidad. Los gaviones se construyen en diversas medidas clasificados que van del módulo "A" hasta el "K", este último se refiere a una unidad de gavión estandarizada con dimensiones de 1 metro de largo, ancho y alto, que representa un volumen de 1 m³. Es uno de los tamaños más utilizados debido a su facilidad de apilamiento y manejo.

La estructura de gaviones está localizada en un talud que colinda con la carretera. Esta cumple una función de muro de contención, cuya finalidad es evitar deslizamientos de suelo y proteger tanto la vía

como las viviendas ubicadas en la parte superior del talud.

Tabla 1. *Dimensiones de la fabricación de gaviones.*

Código del módulo	Largo [mts]	Ancho [mts]	Alto [mts]	Volumen [m³]
A	2	1	1	2
B	3	1	1	3
D	2	1	0.5	1
G	2	1	0.3	0.6
J	1.5	1	1	1.5
K	1	1	1	1

JUSTIFICACIÓN

El muro de gaviones se encuentra en un tramo carretero estratégico que conecta comunidades rurales y urbanas del estado de Hidalgo. Su estabilidad garantiza la seguridad de los habitantes que transitan diariamente, ya sea en transporte público, privado o de carga. Un eventual colapso del talud pondría en riesgo vidas humanas y viviendas ubicadas en la parte superior de la ladera, por lo que su estudio contribuye directamente al bienestar social y a la prevención de desastres. La justificación económica en este documento argumenta el hecho de que la Carretera Federal 105 es un corredor logístico vital para el transporte de mercancías y servicios.

La justificación cultural se plantea en el contexto de que las comunidades asentadas en la zona poseen tradiciones y vínculos históricos con el territorio. Mantener la infraestructura vial en condiciones seguras asegura la continuidad de intercambios culturales, acceso a centros educativos y de salud, y la preservación de prácticas comunitarias que dependen de la movilidad y conexión regional. La justificación política asertiva indica que el mantenimiento de carreteras forma parte de la responsabilidad del Estado en garantizar infraestructura segura y funcional.

Evaluar riesgos estructurales mediante estudios profesionales transparentes fortalece la toma de decisiones públicas, incrementa la confianza ciudadana y responde a lineamientos nacionales de protección civil y gestión de riesgos. La evaluación de estos sistemas no solo permite determinar su desempeño estructural, sino también comprender los procesos de interacción suelo–estructura bajo condiciones ambientales cambiantes, como la erosión y la disminución de precipitaciones [4,5].

HIPÓTESIS

Se plantea que la estabilidad estructural del muro de gaviones en el tramo analizado de la Carretera Federal México 105 está directamente condicionada por las propiedades geotécnicas del suelo (densidad, ángulo de fricción interna y capacidad de carga admisible) y por la acción de procesos de erosión superficial no controlada. En este sentido, se hipotetiza que: "La disminución progresiva de la densidad y cohesión del suelo, combinada con la ausencia de medidas de drenaje y la interrupción del sistema de gaviones en el cadenamiento 0+030, reduce el Índice de Integridad del Suelo (IIS) por debajo de niveles críticos de seguridad, comprometiendo la estabilidad del muro y aumentando el riesgo de deslizamiento en el talud".

OBJETIVO

El objeto de estudio en este documento es un muro de contención construido con gaviones tipo K, ubicado en un talud adyacente a la Carretera Federal México 105, en el Estado de Hidalgo. Esta estructura fue diseñada con el propósito de estabilizar el terreno y evitar deslizamientos de tierra o erosión que pudieran afectar el camino o las viviendas ubicadas en la cima de la ladera. El presente estudio tiene como objetivo científico evaluar la estabilidad estructural y geotécnica de un muro de contención construido con gaviones en la Carretera Federal México 105, en el estado de Hidalgo, a fin de proponer un método cuantitativo que permita diagnosticar y anticipar riesgos de falla en taludes carreteros.

MÉTODOS Y MATERIALES

La metodología empleada en este estudio se fundamenta en un enfoque integral que combina observaciones de campo, levantamientos topográficos, ensayos geotécnicos y análisis estadístico de tendencias. El proceso inició con un reconocimiento preliminar del sitio, en el cual se delimitaron los cadenamientos de análisis (0+000 a 0+030) mediante georreferenciación con GPS y registro fotográfico de las condiciones estructurales del muro de gaviones. Posteriormente, se ejecutó un levantamiento topográfico longitudinal y transversal, con el fin de caracterizar la geometría del talud y la disposición modular de los gaviones.

En paralelo, se realizaron exploraciones geotécnicas en cinco sondeos, con profundidades entre 4 y 8 m, de los cuales se extrajeron muestras de suelo. Estas fueron sometidas a ensayos de laboratorio conforme a procedimientos estandarizados (densidad natural, corte directo para ángulo de fricción interna y correlaciones SPT para capacidad de carga admisible). En los tramos erosionados, donde no fue posible obtener muestras directas, se aplicaron inferencias estadísticas basadas en correlaciones estadísticas y tendencias regionales [6], se siguió el procedimiento metodológico que se describe a continuación [7]:

1. Reconocimiento preliminar y referencia del sitio: Se realizó una visita de campo para identificar la sección de estudio (cadenas 0+000 a 0+030) y registrar puntos clave mediante GPS.
2. Levantamiento topográfico: Se obtuvo un perfil longitudinal de la carretera para determinar

la pendiente general y ubicar el área de intervención. Se ejecutaron perfiles transversales en las estaciones 0+000, 0+005, 0+010, 0+015, 0+020, 0+025 y 0+030; estos cortes permitieron caracterizar la geometría del talud y la disposición del muro de gaviones (niveles de 4 a 5 módulos tipo K).

3. Registro fotográfico: Se documentó el estado del muro y el área erosionada a través de fotografías de alta resolución, lo que permitió un análisis cualitativo de fallas y discontinuidades [8].
4. Exploración geotécnica del suelo: Se perforaron cinco sondeos entre las cadenas 0+000 y 0+020, con profundidades que oscilaron entre 4 y 8 m. Se obtuvieron muestras inalteradas y se realizaron pruebas de laboratorio para determinar densidad natural (γ), ángulo de fricción interna (ϕ) y capacidad de carga admisible (q_d). En las estaciones 0+025 y 0+030 no fue posible tomar muestras debido a la erosión; Los parámetros fueron inferidos a través de tendencias estadísticas y correlaciones para suelos granulares.
5. Análisis y evaluación: Con los datos topográficos y geotécnicos se verificó la estabilidad del muro de gaviones mediante giro y deslizamiento. Se identificaron las áreas críticas (cadena 0+030) y se formularon recomendaciones de refuerzo y drenaje [9, 10].
6. Determinación de la estimación del índice de integridad del suelo utilizando la exploración geotécnica, definirla como una medida relativa del estado de compactación, identificando la humedad relativa de la última década y verificando la cohesión superficial del perfil granular [11].

Procedimiento para la obtención de datos

Para llevar a cabo el diagnóstico integral del sitio, se implementaron diferentes técnicas de recolección y análisis de datos, agrupadas en tres áreas clave: ubicación geográfica, caracterización geotécnica del suelo y evaluación de la erosión activa.

1. Obtención de datos geográficos del sitio: La ubicación precisa del área de estudio se determinó utilizando herramientas de georreferenciación digital. Se utilizó la aplicación Google Maps y la navegación GPS en campo para registrar las coordenadas del tramo intervenido, ubicado sobre la Ruta Federal 105. La referencia espacial se estableció en latitud 20.121202° N y longitud -98.696680° W, lo que permitió integrar la información con los planos topográficos y de diseño.
2. Obtención de parámetros geotécnicos del suelo: La caracterización del suelo se realizó a través de ensayos de campo y laboratorio, a partir de cinco sondeos en las cadenas 0+000 a 0+020. Cada pozo alcanzó profundidades entre 4 y 8 metros. Los parámetros fundamentales obtenidos fueron:

Densidad natural (γ): calculada a partir del peso seco y volumen de muestras inalteradas extraídas en campo. Ángulo de fricción interna (ϕ): determinado por ensayos de cizallamiento directo en laboratorio. Capacidad de carga admisible (q_d): estimada a través de correlaciones con resultados de penetración estándar (SPT) y características físicas del suelo [12].

Evaluación del terreno

1. Análisis de erosión y evidencias de degradación del suelo. La Figura 2 correspondiente a la cadena 0+030 muestra evidencias claras de erosión superficial y lateral.
2. Se identifica la pérdida de capa orgánica y finos, así como la exposición de niveles más profundos del perfil del suelo. Este fenómeno es propio de procesos de erosión hídrica acelerada, producida por escorrentía no canalizada en un talud no protegido.
3. La erosión observada se puede clasificar como erosión en surcos y cárcavas incipientes, debido a la forma irregular del talud, la pérdida de material y el corte lateral asimétrico en la base. Este proceso se ve agravado por la ausencia de gaviones al final, lo que permite el arrastre progresivo del suelo durante los eventos de lluvia. La evolución de esta erosión compromete la estabilidad de la carretera y de los elementos estructurales vecinos si no se mitiga con prontitud [13].

Índice de integridad del suelo

La estimación del índice de integridad del suelo se definió como una medida relativa del estado de compactación, humedad y cohesión superficial del perfil granular. Se determinó con base en una combinación de observaciones de campo, resultados de laboratorio (densidad y humedad natural) y análisis cualitativos de la erosión. Para años anteriores con datos directos estadísticos de la última década, se utilizó una regresión lineal ajustada por la tendencia de pérdida de densidad y cohesión observada entre 2015 y 2024 [14].

Este índice se expresa como un porcentaje relativo tomando como referencia el año 2015 (100 %) y disminuyendo a medida que se reduce la capacidad del suelo para resistir los esfuerzos cortantes. Su aplicación permite evaluar la degradación del talud a lo largo del tiempo y justificar técnicas de recuperación o refuerzo estructural en función de la evolución de las condiciones ambientales [15].

El índice se obtiene a partir del análisis combinado de resultados de laboratorio (densidad seca, humedad natural), inspecciones de campo visual (presencia de erosión, grietas, hundimientos) y datos climáticos que influyen en la infiltración y el comportamiento del suelo [16]. Se expresa como un porcentaje respecto a condiciones de referencia ideales y se determina con la Ec. (1).

$$IIS = \frac{\frac{\rho_d}{\rho_{d_ref}} * \frac{\phi}{\phi_{ref}} * \frac{q_d}{q_{d_ref}}}{(1 + E)} * 100 \quad (1)$$

Dónde: ρ_d : Densidad seca medida del suelo (kg/m^3) ρ_{d_ref} : Densidad seca de referencia (condición óptima) ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo ($^\circ$) ϕ_{ref} : Ángulo de fricción de referencia q_d : Capacidad de carga admisible medida (kg/cm^2) q_{d_ref} : Capacidad de carga de referencia E : Factor de erosión estimado (sin dimensión)

RESULTADOS

En este trabajo se presenta un cadenamiento que muestra un sistema de referencia lineal que indica la ubicación exacta a lo largo del eje de una carretera o carretera. Se expresa en metros desde un punto de vista de partida (desde el 0+000 hasta el cadenamiento 0+030) [17].

Parámetros geotécnicos

La Tabla 2 muestra los resultados de la caracterización geotécnica del suelo en distintos cadenamientos de un muro de contención con gaviones, ubicado entre las estaciones 0+000 y 0+030. Se presentan cuatro parámetros principales: densidad natural del suelo (γ), ángulo de fricción interna (ϕ), capacidad de carga admisible (q_d) y profundidad de exploración. Los parámetros γ , ϕ y las correlaciones SPT empleadas para estimar q_d se determinaron conforme a procedimientos estandarizados [18].

Tabla 2. Parámetros geotécnicos del suelo.

Cadenamiento	γ (kg/m^3)	ϕ ($^\circ$)	q_d (kg/cm^2)	Profundidad (m)
0+000	1560	30	10	6
0+005	1495	28	7	7
0+010	1505	27	8	8
0+015	1620	29	12	6
0+020	1570	28	10	5
0+025*	1525	27	9	6
0+030*	1480	26	8	6

* Valores inferidos por correlaciones y tendencia estadística debido a la imposibilidad de muestreo directo.

Perfil longitudinal

En la Figura 2 se muestra el perfil longitudinal del tramo de la Carretera Federal 105 correspondiente a los primeros 30 metros de la cadena bajo análisis. La vía se caracteriza por una pendiente descendente continua, comenzando a una cota de 100.73 m en la cadena 0+000 y descendiendo hasta los 99.37 m en la

cadena 0+030.

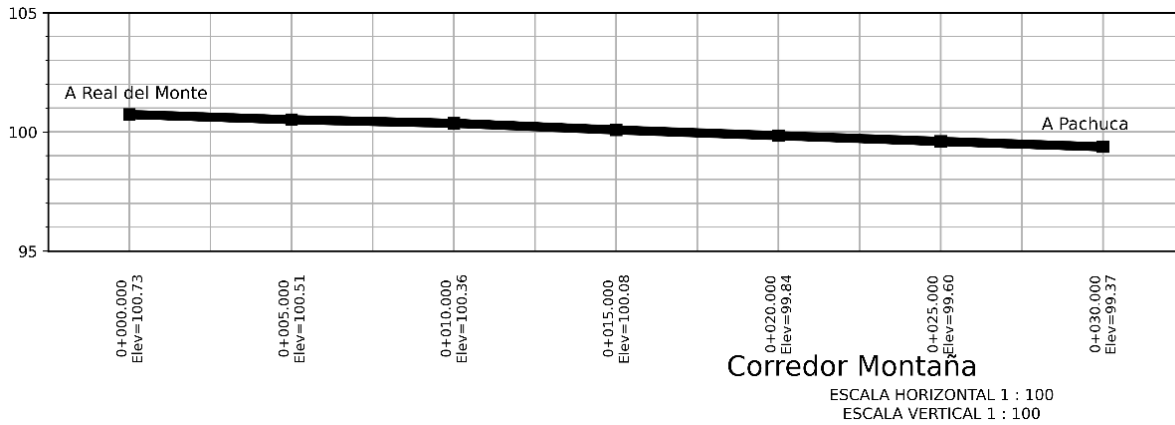


FIGURA 2. Perfil longitudinal de la sección 0+000 a 0+030.

Desde el punto de vista técnico, el perfil longitudinal es esencial para la evaluación de la estabilidad del muro de contención, ya que permite identificar las áreas con mayor riesgo de acumulación de tensiones laterales, puntos bajos propensos al encharcamiento y condiciones de taludes que requieren contención o drenaje adicional [15, 19, 20].

Perfil transversal 0+000 y 0+005

El perfil de la sección transversal en estación 0+000 y 0+005 (Figura 3) muestra cinco niveles de gaviones correctamente incrustados en la base del talud. La cota de la pendiente es de 100.73 m, siendo el punto más alto de la sección.

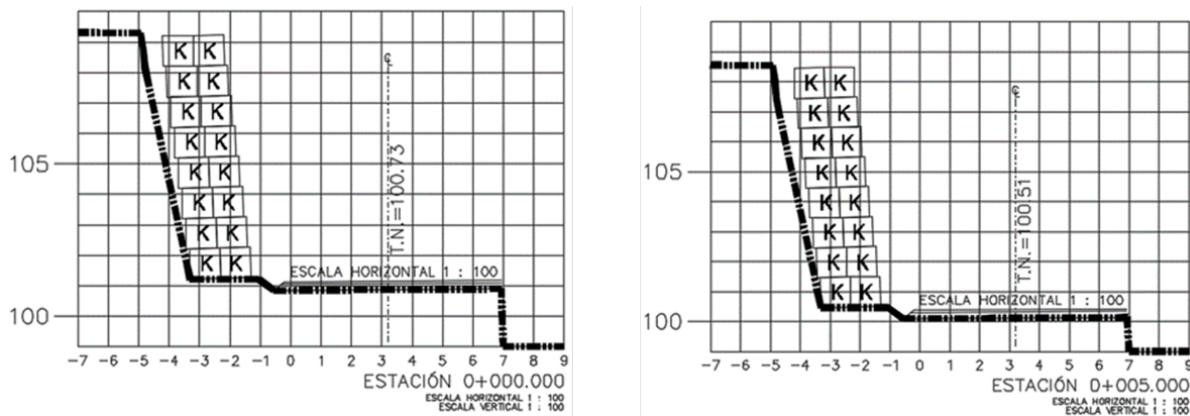


FIGURA 3. Perfil transversal en estación 0+000 (elevación 100.73 m), en estación 0+005 (elevación 100.51 m).

La pendiente natural se ha contenido de forma escalonada, lo que permite una distribución uniforme de las tensiones. Esta configuración es estructuralmente estable y sirve como referencia de diseño para el resto de la sección.

Perfil transversal 0+010 y 0+015 y 0+020

En la estación 0+010 (Figura 4), el perfil continúa con cinco niveles de gaviones.

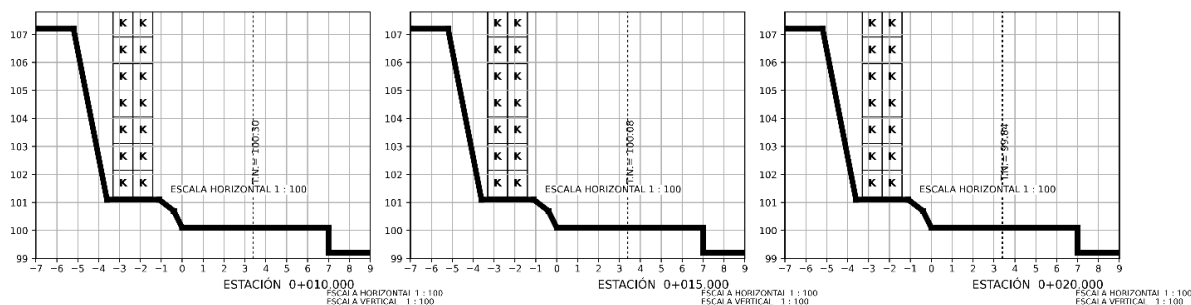


FIGURA 4. Perfil transversal en estación 0+010 (elevación 100.30 m); en estación 0+015 (elevación 100.08 m); en estación 0+020 (elevación 99.84 m).

La pendiente se vuelve más vertical y se reduce la incrustación en la base. Esta geometría representa una condición de mayor tensión lateral sobre la base del muro, por lo que es fundamental controlar la escorrentía y la compactación adecuada de la espalda para evitar movimientos diferenciales [14, 15, 18].

Evaluación de perfiles

Se muestra la secuencia de perfiles de sección transversal levantados cada 5 m a lo largo de la pendiente. Se puede observar cómo la base del muro se alinea con la plataforma vial, mientras que la altura de contención varía de cinco a cuatro niveles de gaviones a medida que desciende la pendiente. La geometría modular se adapta a la topografía, manteniendo la estabilidad de la gravedad. El empotramiento disminuye desde estación 0+005, lo que coincide con una pendiente más vertical, situación que requiere verificación de drenaje y refuerzo en zonas críticas (especialmente 0+030, no contenida) [10, 21].

Comparación de parámetros

En la Tabla 3 se resumen los principales parámetros geométricos y constructivos de cada estación. Se produce una disminución progresiva de la elevación del talud y del número de niveles de gaviones. La pendiente se vuelve más vertical hacia la cadena 0+020, lo que sugiere una mayor presión lateral y la necesidad de controlar la escorrentía superficial para evitar la erosión. Los resultados muestran que la elevación de la base desciende progresivamente de 100.73 m (0+000) a 99.84 m (0+020), lo cual refleja la adaptación del muro a la topografía natural. En cuanto al número de niveles, el tramo inicial (0+000 a 0+010) mantiene cinco gaviones estables en disposición vertical o escalonada, condición que garantiza una

mayor resistencia. Sin embargo, a partir del cadenamiento 0+015 se reduce a cuatro niveles, situación que coincide con un cambio en la inclinación del talud hacia configuraciones "muy verticales" "pronunciadas", aumentando el riesgo estructural [10, 15, 21].

Tabla 3. Comparación de Parámetros geotécnicos del suelo.

Cadenamiento	0+000	0+005	0+010	0+015	0+020
Elevación de la base (m)	100.73	100.51	100.30	100.08	99.84
Niveles de gaviones estables	5	5	5	4	4
Empotrable	Moderado	Bajo	Bajo	Bajo	Inestable
Cuesta	Escalonado	Recto	Vertical	Muy vertical	Pronunciado

El grado de emportabilidad varía desde moderado y bajo en los primeros cadenamientos hasta inestable en 0+020, donde la pendiente es más abrupta y la contención pierde efectividad. Estos parámetros evidencian que la estabilidad global del muro disminuye conforme avanza el tramo, siendo necesario reforzar los sectores con menor número de gaviones y mayor inclinación para prevenir procesos de erosión y deslizamiento.

Caracterización geotécnica de suelos

La Figura 5 muestra la variación de los parámetros geotécnicos a lo largo de la sección 0+000 a 0+020. Las densidades van de 1,450 a 1,620 kg/m³, con ángulos de fricción internos de 26°-30° y capacidades de carga admisibles de 7-12 kg/cm².

Estos valores son consistentes con un suelo granular de compactación media [6]. Presenta la variación de parámetros geotécnicos en distintos cadenamientos (0+000 a 0+020) para evaluar la estabilidad del terreno asociado a muros de gaviones. En el eje principal se representa la densidad del suelo (kg/m³) mediante la línea roja, que oscila entre 1,480 y 1,620 kg/m³, evidenciando heterogeneidad en la compactación.

Índice de Integridad del Suelo

Con relación a la variación estimada de la precipitación anual durante la última década en la región de estudio [22]. Los datos de 2023 (413 mm) y el acumulado parcial de 2024 (365 mm hasta julio) se obtuvieron de fuentes públicas de consulta meteorológica e hidrológica.

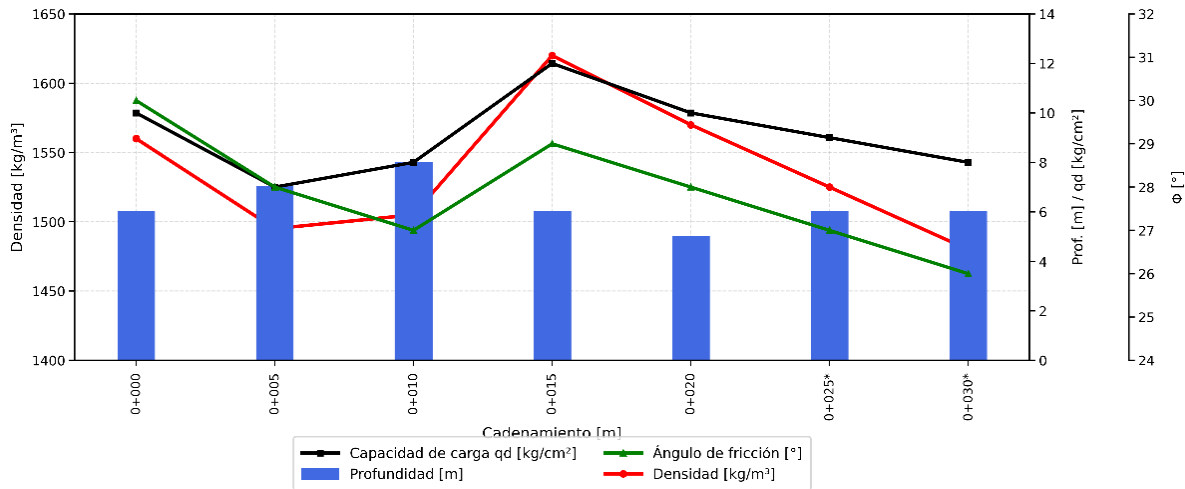


FIGURA 5. *Parámetros geotécnicos del suelo por cadena (densidad, ϕ , q_d y profundidad de exploración).*

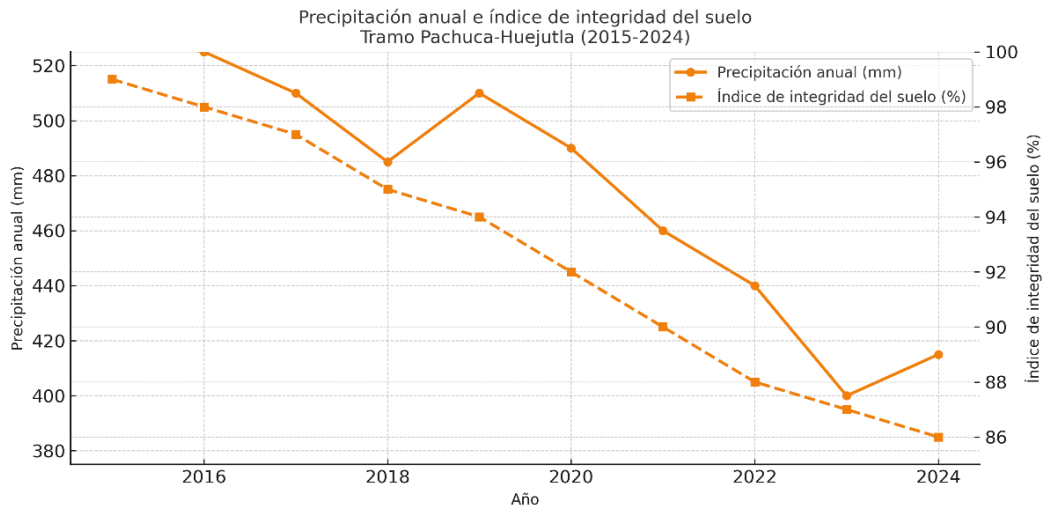


FIGURA 6. *Índice anual de precipitación e integridad del suelo (2015-2024).*

La Figura 6 presenta la relación entre la precipitación anual y el índice de integridad del suelo durante la última década. Se observa que, a medida que disminuye la precipitación total, el índice de integridad del suelo también muestra una tendencia a la baja, lo que sugiere una pérdida progresiva de humedad [23] y compactación en el material granular del talud. En 2015 y 2016, la precipitación anual superó los 525 mm y el IIS se mantuvo cercano al 100 %, lo que indica condiciones óptimas de humedad y estabilidad. Sin embargo, a partir de 2017 se observa una disminución progresiva: la precipitación cae por debajo de los 500 mm y el IIS desciende a valores menores al 95 %.

La situación se agudiza en 2020–2022, donde la reducción de lluvias coincide con un IIS inferior al 90 %, señalando un deterioro progresivo de la compactación y resistencia del suelo [24]. Para 2024, la precipitación alcanza valores cercanos a 375 mm y el IIS desciende a 85 %, representando condiciones críticas de estabilidad. Este comportamiento confirma que la pérdida progresiva de humedad es un factor determinante en la reducción del IIS, aumentando el riesgo de deslizamientos [25] y comprometiendo la seguridad de la infraestructura carretera. En suelos parcialmente saturados, la variación de humedad puede modificar la resistencia al corte mediante la succión matricial, aspecto ampliamente descrito en la literatura clásica [26, 27].

Análisis

la pérdida de humedad reduce las fuerzas capilares que contribuyen a la estabilidad de los suelos arenosos, mientras que la menor densidad observada favorece la migración de finos y el desarrollo de micro fisuras. El análisis de los parámetros geotécnicos revela diferencias significativas entre los cadenamientos estables y críticos. En los tramos 0+000 a 0+015, los suelos presentan densidades cercanas a 1,600 kg/m³, ángulos de fricción entre 28° y 30°, y capacidades de carga (q_d) de hasta 12 kg/cm², lo que indica condiciones estructuralmente favorables.

Comportamiento del suelo

La Figura 7 muestra la variación de parámetros geotécnicos a lo largo del cadenamiento, considerando el Índice de Integridad del Suelo (IIS %), ángulo de fricción interna (Φ°), carga de diseño (q_d , kg/cm²) y densidad aparente (γ , kg/m³). Se observa que el IIS presenta una tendencia descendente constante desde 0+000 hasta 0+030, pasando de 94 % a aproximadamente 80 %, lo cual refleja una disminución gradual de la capacidad portante superficial del suelo [21, 25].

El Índice de Integridad del Suelo (IIS) evidencia una tendencia descendente a lo largo del cadenamiento, partiendo de valores elevados próximos al 94 % y reduciéndose progresivamente hasta alrededor de 80 %. Este comportamiento indica una disminución paulatina en la cohesión y compacidad estructural del suelo, lo que refleja pérdida de homogeneidad y menor capacidad de soporte en zonas específicas. La caída del IIS puede asociarse a cambios en la composición granulométrica, variaciones de humedad o diferencias en la compactación. Tales resultados sugieren que, hacia el final del tramo, el suelo presenta menor integridad y demanda tratamientos correctivos [15, 16].

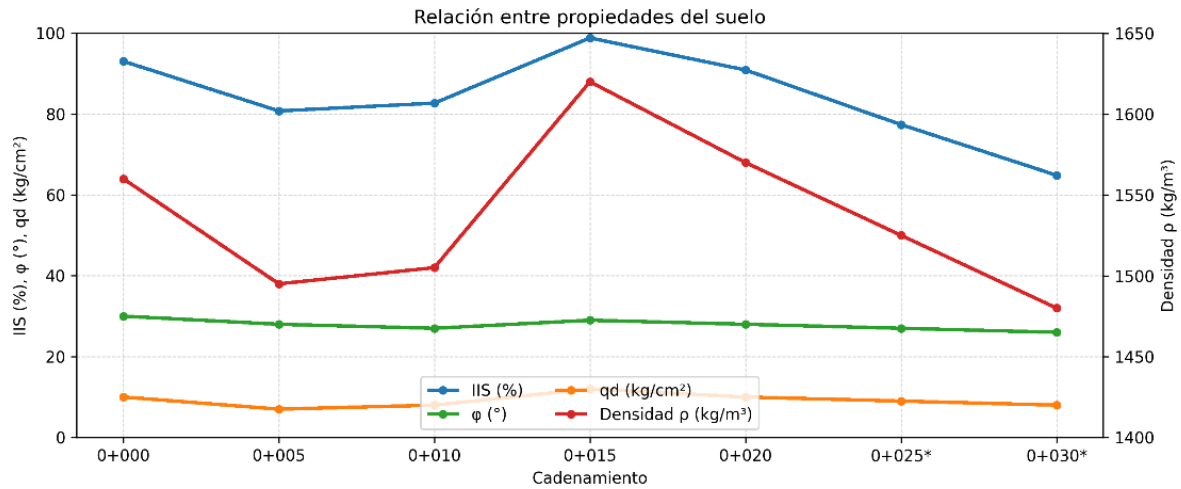


FIGURA 7. Variación de propiedades en cadenamiento.

Nivel de riesgo

El nivel de riesgo es un concepto clave en la gestión de riesgos que expresa la combinación de dos factores: la probabilidad de que ocurra un evento adverso y el impacto o consecuencia que dicho evento tendría sobre un sistema, estructura o comunidad. El nivel de riesgo permite clasificar la vulnerabilidad de un talud, un muro de contención o cualquier infraestructura frente a procesos de deterioro, fallas estructurales o fenómenos naturales como lluvias intensas y erosión. Este nivel no es un valor absoluto, sino una escala relativa que se representa de manera cualitativa (bajo, medio, alto, crítico). Su determinación requiere la evaluación de parámetros técnicos, como densidad del suelo, ángulo de fricción, capacidad de carga y presencia de erosión, así como la consideración de consecuencias sociales, económicas y ambientales en caso de falla.

Tabla 4. Clasificación por rangos (puntos 0–3).

Parámetro	0 Ptos (Bajo)	1 Pto (Medio)	2 Ptos (Alto)	3 Ptos (Crítico)
IIS (%)	≥ 92	88–91	84–87	≤ 83
Φ (°)	≥ 29	27–28	26	≤ 25
q_d (Kg/Cm ²)	≥ 10	9	8	≤ 7
γ (Kg/M ³)	$\geq 1,560$	1,520–1,559	1,490–1,519	$\leq 1,489$

Los umbrales están calibrados a los datos ($IIS \approx 80\text{--}95\%$, $\phi = 26\text{--}30^\circ$, $q_d = 7\text{--}12$, $\gamma = 1,480\text{--}1,620$).

El nivel de riesgo bajo indica que las condiciones del suelo y del muro de contención son favorables para la estabilidad estructural. Un IIS elevado, ángulos de fricción interna cercanos a $29-30^\circ$, cargas admisibles mayores a 10 kg/cm^2 y densidades superiores a $1,560 \text{ kg/m}^3$ reflejan un terreno bien compactado, con buena cohesión y resistencia frente a esfuerzos cortantes. En este escenario, la probabilidad de falla por erosión, asentamiento o deslizamiento es mínima y las consecuencias potenciales serían leves. No obstante, aunque el riesgo se clasifica como bajo, es recomendable mantener un monitoreo preventivo periódico para garantizar seguridad.

El nivel de riesgo medio refleja condiciones del suelo con ligeras deficiencias en parámetros geotécnicos, que reducen parcialmente la estabilidad estructural. Un IIS en torno a $88-91 \%$, ángulos de fricción de $27-28^\circ$, cargas admisibles entre $8-9 \text{ kg/cm}^2$ y densidades entre $1,500-1,559 \text{ kg/m}^3$ sugieren un terreno de compactación intermedia, con resistencia adecuada pero vulnerable a procesos de erosión o saturación. En este rango, la probabilidad de falla es moderada y las consecuencias pueden requerir mantenimiento correctivo, como refuerzo de gaviones o drenaje adicional. Aunque no implica un riesgo crítico inmediato, demanda vigilancia constante y acciones preventivas tempranas.

El nivel de riesgo alto indica que el suelo y la estructura presentan condiciones serias de estabilidad, con parámetros geotécnicos cercanos a valores mínimos de seguridad. Un IIS por debajo del 86% , ángulos de fricción reducidos ($\approx 26^\circ$), cargas admisibles de $7-8 \text{ kg/cm}^2$ y densidades próximas a $1,480-1,519 \text{ kg/m}^3$ revelan una pérdida significativa de compactación y resistencia. En este escenario, la probabilidad de falla por erosión, deslizamiento o deformación es elevada, y las consecuencias podrían afectar la vía y poner en riesgo a los usuarios. El nivel alto requiere intervenciones inmediatas de refuerzo, drenaje y estabilización para prevenir colapsos.

El nivel de riesgo crítico representa la condición más grave en términos de estabilidad del suelo y de la estructura de contención. Se caracteriza por un Índice de Integridad del Suelo (IIS) $\leq 83 \%$, ángulos de fricción muy bajos ($\leq 25^\circ$), cargas admisibles $\leq 7 \text{ kg/cm}^2$ y densidades menores a $1,480 \text{ kg/m}^3$, lo que refleja pérdida extrema de cohesión, compactación y capacidad portante. En este estado, la probabilidad de falla es inminente y las consecuencias incluyen deslizamientos severos, interrupción de la vía y afectaciones a viviendas o usuarios. Este nivel exige acciones urgentes de contención, drenaje profundo y estabilización integral [15, 19, 25].

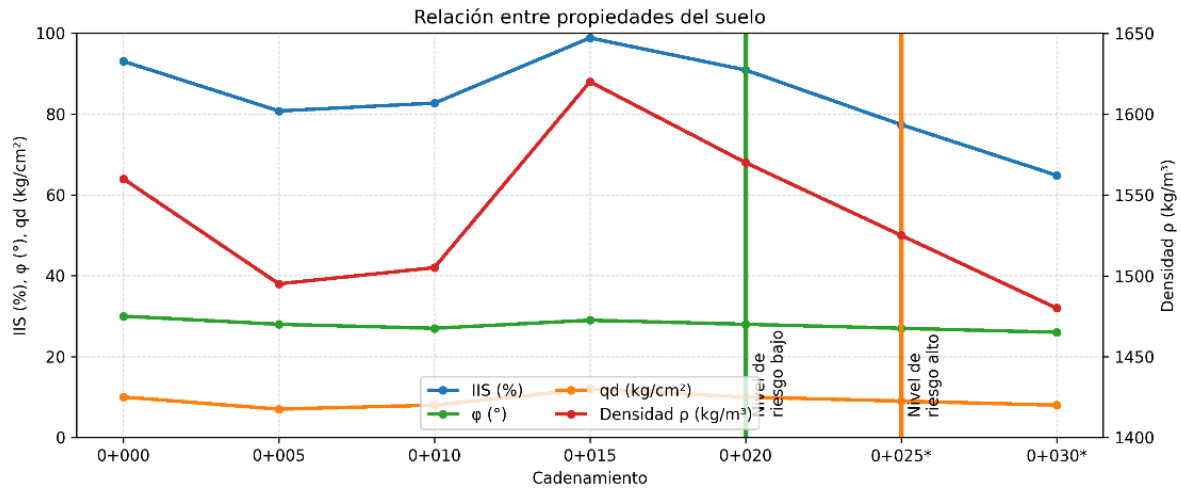


FIGURA 8. Nivel de riesgo.

La Figura 8 expone la variación de parámetros geotécnicos fundamentales —Índice de Integridad del Suelo (IIS), ángulo de fricción interna (ϕ), carga de diseño (q_d) y densidad aparente (γ)— a lo largo del tramo comprendido entre los cadenamientos 0+000 y 0+030. Además, se identifican rangos de riesgo bajo y riesgo medio, lo que permite establecer un diagnóstico comparativo del comportamiento del suelo en relación con la estabilidad del muro de contención con gaviones.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos del análisis topográfico, geotécnico y fotográfico permiten establecer una clara correlación entre la geometría del muro de gaviones, las condiciones del terreno y el comportamiento observado en el sitio de estudio. El sistema de contención se ha implantado correctamente en la mayor parte del tramo, especialmente en los primeros 20 metros de la cadena (0+000 a 0+020), donde los perfiles muestran una configuración estable, con un adecuado empotramiento y adaptación a la pendiente del talud. Esta disminución indica una pérdida de compacidad, posiblemente causada por la infiltración de agua y el transporte de finos, lo que aumenta la susceptibilidad a deformaciones y asentamientos. En el sector inicial, que abarca los cadenamientos 0+000 a 0+015. El IIS se mantiene en valores elevados, cercanos al 90–94 %, mientras que la densidad aparente alcanza hasta 1,620 kg/m³, lo cual indica un suelo compactado y con adecuada resistencia mecánica. Se evidencia que el tramo presenta zonas con buen desempeño inicial, pero también sectores críticos donde la reducción de propiedades geotécnicas compromete la seguridad. En este sentido, resulta necesario implementar medidas de refuerzo en los últimos cadenamientos, como el aumento de niveles de gaviones, el mejoramiento de la compactación y la incorporación de sistemas de drenaje, con el objetivo de garantizar la estabilidad estructural y la continuidad del servicio en la vía [4, 28].

CONCLUSIONES

Luego del análisis exhaustivo del tramo de estudio de la Ruta Federal 105, se concluye lo siguiente:

El análisis de la variación de parámetros geotécnicos a lo largo del cadenamiento 0+000 a 0+030 permitió identificar de manera clara la evolución del comportamiento del suelo y sus implicaciones en la estabilidad del muro de contención con gaviones. Los resultados muestran que los primeros tramos (0+000 a 0+015) presentan condiciones estructuralmente estables, con valores elevados de densidad, ángulo de fricción interna y carga admisible, lo que se refleja en un Índice de Integridad del Suelo (IIS) cercano al 94 %. Estas características ubican al sector inicial en un nivel de riesgo bajo, garantizando un desempeño adecuado del sistema de contención y seguridad para la infraestructura vial. Las conclusiones más relevantes de este estudio indican que el IIS es un parámetro eficaz y práctico para diagnosticar el estado del terreno en interacción con estructuras de contención. Su aplicación en conjunto con variables como densidad, ángulo de fricción y capacidad admisible permite anticipar la pérdida de estabilidad y priorizar medidas de mantenimiento. En consecuencia, se recomienda extender el muro de gaviones en los cadenamientos críticos, reforzar los sistemas de drenaje superficial y profundo, estabilizar el suelo mediante técnicas de compactación controlada y aditivos químicos, e implementar programas de revegetación que reduzcan la erosión. Asimismo, es fundamental establecer un sistema de monitoreo periódico del IIS, de manera que se cuente con un mecanismo preventivo que garantice la seguridad estructural de la carretera y la protección de los usuarios frente a escenarios de riesgo geotécnico.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORES Y COLABORADORES

Estrada-Hernández, D.E.: investigación, preparación del borrador original, análisis bibliotecario. **Cerón-Carballo, J.E.:** conceptualización, pruebas de laboratorio, metodología, software, redacción. **Navarro-Gómez, H. I.:** análisis teórico y validación, metodología y edición final.

REFERENCIAS

- [1] M. Grodecki, “Gabion retaining wall stability – a case study,” *Technical Transactions*, vol. e2025016, 2025.
- [2] R. Chairullah *et al.*, “The investigation of stability on slopes utilizing reinforcement gabion walls and concrete piles for mitigating landslide disasters,” *Open Civil Engineering Journal*, 2024.
- [3] M. T. T. Cho, A. Chueasamat, T. Hori, H. Saito, and Y. Kohgo, “Effectiveness of filter gabions against slope failure due to heavy rainfall,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 2, pp. 544–556, 2021.
- [4] S. Laudari, T. Hara, and H. Nakazawa, “Stability analysis of low-cost gabion revetments for adoption in developing countries: Insights from field investigations and laboratory experiments,” *Journal of Civil Engineering and Architecture*, vol. 18, no. 12, pp. 565–580, 2024.

- [5] M. Wang and L. Li, “Slope stability analysis considering degradation of soil properties induced by intermittent rainfall,” *Water*, vol. 17, no. 6, p. 814, 2025.
- [6] U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration (FHWA), “Geotechnical site characterization,” Geotechnical Engineering Circular (GEC) No. 5, FHWA-NHI-16-072, 2017. [Online]. Available: <https://rosap.nhl.bts.gov/view/dot/40558>
- [7] B. B. Mijic, M. K. Mijic, M. S. Maksimovic, and M. D. Petrovic, “Estimation of maximum and minimum densities of granular soils from grading curves,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 1, pp. 158–175, 2021.
- [8] J. E. Cerón-Carballo, E. Pérez-Isidro, and H. I. Navarro-Gómez, “Análisis de riesgo en puente peatonal tipo armadura utilizando sensores,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 9, no. 18, pp. 40–46, 2022.
- [9] C. Liu, A. Q. Huang, and P. J. Huang, “Field assessment of soil strength based on shear wave velocity,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 1, pp. 176–186, 2021.
- [10] A. Uray and Z. W. Geem, “Metaheuristic approaches for gabion wall stability optimization,” *Mathematics*, vol. 13, no. 19, p. 3216, 2025.
- [11] X. Liu, X. Zhang, L. Kong, X. Li, and G. Wang, “Effect of cementation on the small-strain stiffness of granite residual soil,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 2, pp. 520–532, 2021.
- [12] R. Hinsberger, “Analysis of heavy precipitation-induced rill erosion,” *Environmental Earth Sciences*, vol. 83, no. 11, p. 354, 2024.
- [13] X. Wu, X. Liu, Y. Qiao, and J. Sun, “Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of inner mongolia, china,” *Soil and Water Research*, vol. 16, no. 1, pp. 26–34, 2021.
- [14] T. A. T. Doan, Q. D. Ma, and V. K. Pham, “Study on internal friction angle affected by different groundwater content using finite element method,” *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 21, no. 4, pp. 1056–1067, 2023.
- [15] S. D. Chikute and R. M. Sonar, “Failures of gabion walls and its remedies,” in *Innovations in Infrastructure*, ser. Lecture Notes in Civil Engineering. Springer, 2022.
- [16] Y. Ma, Y. Wang, Y. Zhang, R. Zhang, C. Yuan, C. Ma, and Y. Bai, “Effects of gravel on the water infiltration process and hydraulic parameters of stony soil in the eastern foothills of helan mountain, china,” *Scientific Reports*, vol. 14, p. 16426, 2024.

- [17] Queensland Department of Transport and Main Roads, “Drafting and design presentation standards,” 2021, available: <https://www.tmr.qld.gov.au/business-industry/Technical-standards-publications/Drafting-and-design-presentation-standards>.
- [18] ASTM International, “Standard test methods for laboratory determination of density and unit weight of soil specimens (astm d7263-21); standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions (astm d3080/d3080m-23); standard test method for standard penetration test (spt) and split-barrel sampling of soils (astm d1586/d1586m-18e01),” 2023.
- [19] M. Niromand, A. Derakhshan, M. K. Asadi, and J. P. Frattini, “Dynamic modeling approach for assessing the stability of closed dump slopes,” *Journal of Mining and Environment*, 2024.
- [20] H. Zhang, G. Guo, H. Li *et al.*, “Un nuevo método numérico para calcular la deformación residual en zonas minadas considerando la interacción agua-roca y su aplicación,” *Scientific Reports*, vol. 15, p. 11207, 2025.
- [21] S. Kumar *et al.*, “The effect of slope height and angle on the safety factor and modes of failure of 3d slopes analysis using limit equilibrium method,” *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, 2023.
- [22] L. Brocca *et al.*, “What if rain falls? insights from a wide ensemble of drought scenarios,” in *Climate Change Impacts on Water Resources: Developing Adaptation Strategies*. Atlantis Press, 2023.
- [23] T. Puértolas and I. C. Dodd, “Nocturnal transpiration and soil evaporation both decrease with increasing root length density,” *Plant and Soil*, vol. 475, pp. 377–390, 2022.
- [24] K. Mukunoki, T. Yamakawa, T. Sato, and A. Shimizu, “A simple method for estimating density of sandy soils from shear wave velocity,” *Soils and Foundations*, vol. 61, no. 2, pp. 557–572, 2021.
- [25] S. Zhao *et al.*, “Slope unit-based landslide susceptibility mapping using machine learning models,” *Frontiers in Earth Science*, p. Art. 589630, 2021.
- [26] D. G. Fredlund, N. R. Morgenstern, and R. A. Widger, “The shear strength of unsaturated soils,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 15, no. 3, pp. 313–321, 1978.
- [27] S. K. Vanapalli, D. G. Fredlund, D. E. Pufahl, and A. W. Clifton, “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction,” *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 33, no. 3, pp. 379–392, 1996.
- [28] A. Bhardwaj, A. Bhardwaj, M. Sarda, and N. Bichewar, “Stability analysis and construction of highest gabion wall of its own kind in india-a case study,” *Journal of Mining and Environment*, vol. 15, no. 1, pp. 191–202, 2024.