

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

**Análisis comparativo del comportamiento entre geomalla coextruida y geocelda GW20V
para estabilización de talud en el sector Chuquicahuana, distrito Checacupe – Cusco,**

2024

Asesor:

Mg. Chávarry Morvelí, Daniel

Autores:

Condori Yupanqui, Alfredo

Vargas Pacco, Wilix Sander

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

Cusco – Cusco – Perú

2026



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 002

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Cusco, a los 08 días del mes de Enero del 2026, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Sub Directoral N° 596-2025-UTEA-FC-FI-EPIC de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Mg. Laime Calvo Edixon
Dictaminante:	Mg. Mamani Cutipa Ambrocio
Replicante :	Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Análisis comparativo del comportamiento entre geomalla coextruida y geocelda GW20V para estabilización de talud en el sector Chuquicahuana, distrito Checacupe – Cusco, 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br.: Vargas Pacco Wilix Sander
(Apellidos y Nombres)

Br.: Condori Yupanqui Alfredo
(Apellidos y Nombres)

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

(Denominación del Título)

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO (S):

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Br. Vargas Pacco Wilix Sander	Aprobado
Br. Condori Yupanqui Alfredo	Aprobado

Siendo las 11:00 a.m horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Mg. Laime Calvo Edixon
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Dictaminante: Mg. Mamani Cutipa Ambrocio
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

Replicante: Mg. Alvarez Alvarez Javier Francisco
(Dr. Mg.). (Apellidos y Nombres)

(Firma)

(Firma)

(Firma)

(*) **Mayoría:** Dos integrantes del jurado aprueban o desaprueban; **Unanimidad:** Todos los integrantes del jurado aprueban o desaprueban. Art. 18 RGGAT.
(**) 0 a 10: Desaprobado, 11 a 15: Aprobado, 16 a 18: Aprobado Notable, 19 y 20: Aprobado con Distinción, Art. 18 RGGAT.




8% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 15 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y Nombres	: Condori Yupanqui, Alfredo
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 48713262
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0004-9008-8145
Apellidos y Nombres	: Vargas Pacco, Wilix Sander
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 46288519
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0001-6328-1271
Datos del Asesor	
Apellidos y Nombres	: Mg. Chávarry Morvelí Daniel
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Número de Documento de Identidad	: 40065144
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0006-5550-8057
Datos de la Investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería civil
Línea de Investigación	: Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: Septiembre 2024 – enero 2026
Fuente de Financiamiento	: Autofinanciado
Porcentaje de Similitud	: 8%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

Dedicamos esta tesis a nuestros padres que desde pequeños nos formaron con valores y principios para ser mejores personas cada día, siempre nos orientaron con sabiduría, compartieron sin dudar todo el conocimiento y las experiencias que ellos tuvieron para enfrentar diferentes situaciones de la vida.

Agradecimientos

En primer lugar, expresamos nuestro agradecimiento al divino creador por aarnos regalado la vida y todo lo que viene consigo: alegrías, llanto, tristeza, metas, retos. Y el don de convivir y en algunos casos superar cada una de estas emociones, seguidamente a nuestra gran familia universitaria, que lo consideramos como nuestro segundo hogar que nos acogió durante nuestra etapa de asimilación de conocimientos.

Resumen

La investigación tuvo como objetivo realizar un análisis comparativo técnico-económico entre la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V para la estabilización del talud ubicado entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera CU-117 en el sector Chuquicahuana, Cusco. La metodología comprendió estudios de mecánica de suelos mediante tres calicatas para caracterizar el suelo granular predominante, seguido de un análisis de estabilidad con el software Geostru Slope aplicando el método de Janbu y los lineamientos de la norma CE.020. Se evaluaron las condiciones natural, estática y dinámica (sísmica) del talud, así como el desempeño con cada geosintético. Los resultados indicaron que ambos materiales incrementan el Factor de Seguridad por encima de los mínimos normativos (F.S. ≥ 1.50 estático; ≥ 1.25 dinámico). La Geocelda GW20V presentó un mejor desempeño técnico (F.S. 1.78 estático; 1.32 dinámico) debido a su confinamiento tridimensional y mayor redistribución de esfuerzos. Sin embargo, el análisis económico con el software Delphin Express mostró que la Geomalla Coextruida es 5% más económica. Se concluye que la Geocelda GW20V es la alternativa técnicamente óptima para maximizar la seguridad, especialmente sísmica, mientras que la Geomalla Coextruida representa la opción de menor costo, cumpliendo con los requisitos normativos y ofreciendo una solución costo-efectiva.

Palabras claves: Geosintéticos, geomalla coextruida, geocelda GW20V, estabilidad de taludes, factor de seguridad.

Abstract

This research aimed to perform a technical-economic comparative analysis between Coextruded Geogrid and Geocell GW20V for stabilizing the slope located between stations km 161+956 and km 162+056 of the CU-117 road in the Chuquicahuana sector, Cusco. The methodology included soil mechanics studies through three test pits to characterize the predominant granular soil, followed by a stability analysis using Geostru Slope software, applying Janbu's method and the guidelines of the CE.020 standard. Natural, static, and dynamic (seismic) slope conditions, as well as the performance with each geosynthetic, were evaluated. The results indicated that both materials increase the Safety Factor above regulatory minimums (F.S. ≥ 1.50 static; ≥ 1.25 dynamic). Geocell GW20V showed better technical performance (F.S. 1.78 static; 1.32 dynamic) due to its three-dimensional confinement and better stress redistribution. However, the economic analysis using Delphin Express software showed that the Coextruded Geogrid is 5% more economical. It is concluded that Geocell GW20V is the technically optimal alternative for maximizing safety, especially seismic, while the Coextruded Geogrid represents the lower-cost option, meeting regulatory requirements and offering a cost-effective solution.

Keywords: Geosynthetics, coextruded geogrid, geocell GW20V, slope stability factor of safety.

Índice

Portada.....	i
Acta de sustentación.....	ii
Reporte de similitud.....	iii
Metadatos.....	iv
Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Resumen.....	vii
Abstract.....	viii
Índice.....	ix
Índice de tablas.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de anexo.....	xv
I. Introducción.....	16
II. Planteamiento del problema.....	18
2.1. Descripción y formulación del problema.....	22
2.2. Objetivos.....	23
2.1.1. Objetivo general.....	23
2.1.2. Objetivos específicos.....	23
2.3. Justificación e importancia.....	24
2.4. Hipótesis.....	26
2.5. Variables.....	27

III.	Marco teórico	29
3.1.	Antecedentes.....	29
3.2.	Bases teóricas	36
3.3.	Definición de términos	68
IV.	Metodología.....	73
4.1.	Tipo y nivel de investigación.....	73
4.2.	Ámbito temporal y espacial.....	74
4.3.	Población y muestra	74
4.4.	Instrumentos	76
4.5.	Procedimientos	81
4.6.	Análisis de datos	84
4.7.	Consideraciones éticas.....	85
V.	Resultados y discusión.....	86
VI.	Conclusiones.....	126
VII.	Recomendaciones.....	128
VIII.	Referencias	130
IX.	Anexos.....	135

Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de Variables	28
Tabla 2. Coeficientes de seguridad para el análisis de estabilidad de taludes	39
Tabla 3. Clasificación de Geocelda según el tamaño de las celdas	40
Tabla 4. Características Técnicas de la Geocelda GW20V.....	41
Tabla 5. Resultados de análisis granulométrico.....	88
Tabla 6. Resultados de ensayo de límites de consistencia	89
Tabla 7. Resultados de ensayo de humedad.....	90
Tabla 8. Resultados de ensayo peso específico.....	91
Tabla 9. Resultado de ensayo corte directo.....	92
Tabla 10. Resumen de resultados de propiedades físicas del suelo	93
Tabla 11. Resumen de resultados propiedades mecánicas del suelo.....	94
Tabla 12. Resumen de análisis descriptivo y estadístico de los ensayos	95
Tabla 13. Modelamiento en condición de su estado satura (γ) y seco (γ).....	97
Tabla 14. Análisis de modelamiento por métodos en Geostru Slope.....	98
Tabla 15. Resumen: Análisis comparativo por calicata en Condición del Talud.....	99
Tabla 16. Estadística Descriptiva por Condición del Talud por calicatas.....	100
Tabla 17. Resultado de Probabilidad de Falla y Confiabilidad de falla.....	101
Tabla 18. Resultado de parámetros dinámicos del suelo y su clasificación.	102
Tabla 19. Parámetros Sísmicos del terreno del proyecto.	103
Tabla 20. Propiedades mecánicas de las rocas.....	104
Tabla 21. Interpretación técnico modelamiento en estado natural del suelo	107
Tabla 22. Interpretación del modelamiento estático con Geocelda GW20V.	110
Tabla 23. Interpretación de modelamiento dinámico con Geocelda GW20V	112
Tabla 24. Interpretación del modelamiento estático con Geomalla coextruida.....	114

Tabla 25. Interpretación de modelamiento dinámico - Geomalla Coextruída.....	116
Tabla 26. Costo directo por sub – presupuesto Geocelda GW20V	118
Tabla 27. Costo específico de la Geocelda GW20V.....	118
Tabla 28. Resumen de costo – total Geocelda GW20V.....	119
Tabla 29. Costo directo por sub – presupuesto Geomalla Coextruida.....	120
Tabla 30. Costo específico de la Geomalla Coextruida.....	120
Tabla 31. Resumen de costo – total Geomalla Coextruida.....	121
Tabla 32. Comparativo entre Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V.....	122

Índice de figuras

Figura 1. Deslizamiento de talud en el sector Chuquicahuana.....	21
Figura 2. Geología Regional.....	21
Figura 3. Partes de un talud	37
Figura 4. Nomenclatura de un Deslizamiento	38
Figura 5. Movimiento de masas	39
Figura 6. Apertura de Geocelda.....	41
Figura 7. Geomalla coextruida mono-orientadas	43
Figura 8. Geomalla Coextruida Bi-orientada	44
Figura 9. Factores que producen fallas de estabilidad de ladera y taludes.....	46
Figura 10. Tipos de fallas más comunes en taludes.....	48
Figura 11. Representación gráfica del método de Janbu	53
Figura 12. Planta y perfil del terreno natural.....	58
Figura 13. Relación pendiente - área de la zona de estudio	60
Figura 14. Contexto geológico regional	62
Figura 15. Diagrama de Propagación de Ondas Sísmicas.....	63
Figura 16. Propagación de Ondas P	64
Figura 17. Propagación de las ondas S.....	65
Figura 18. Ámbito temporal y espacial – Chuquicahuana	74
Figura 19. Ubicación política general de la zona de estudio.....	86
Figura 20. Estudio de las tres calicatas y estudio geofísico en situ.....	87
Figura 21. Proceso de modelación en el software Geostru Slope	96
Figura 22. Perfil geosismico generalizado a partir de Vs.....	103
Figura 23. Modelamiento estático de talud en estado natural.	105
Figura 24. Modelamiento dinámico de talud en estado natural.....	106

Figura 25. Análisis de estabilidad estático con Geocelda GW20V	109
Figura 26. Análisis dinámico con Geocelda GW20V	111
figura 27. Análisis de estabilidad de talud con geomalla Coextruida.....	113
Figura 28. Análisis dinámico con Geomalla coextruida.....	115

Índice de anexo

Anexo 1. Matriz de Consistencia	136
Anexo 2. Operacionalización de variables	141
Anexo 3. Estudio geofísico	142
Anexo 4. Estudio de mecánica de suelos	205
Anexo 5. Estudio topográfico.....	251
Anexo 6. Informe de modelamiento - Geostru Slope.....	269
Anexo 7. Análisis de costos y presupuestos	301
Anexo 8. Planos de Investigación	334
Anexo 9. Fotografías de ejecución de ensayos.....	343

I. Introducción

En la ingeniería civil, la estabilidad de taludes es uno de los aspectos más importantes, considerando las zonas andinas como escenarios críticos debido a las condiciones del terreno y las fuertes precipitaciones que favorecen la ocurrencia de deslizamientos. En zonas como Chuquicahuana, los desprendimientos de tierras afectan directamente a la red vial y la continuidad de tránsito, perjudicando a las comunidades que utilizan esta red. Por lo tanto, resulta elemental, en una primera instancia, brindar una introducción sobre la relevancia de abordar este problema y de analizar alternativas de solución óptima para el sector. Dentro de las opciones existentes, los geosintéticos se han utilizado como herramientas eficientes para reforzar los taludes y mejorar la conducta del suelo. En este escenario, la propuesta de investigación está enfocada en la evaluación de dos alternativas: Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, con el fin de determinar su pertinencia para la estabilización del talud entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 de la carretera CU-117.

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, la presente investigación plantea una pregunta central: *¿Qué geosintético ofrece un mejor rendimiento técnico y económico en el proceso de estabilización del talud en el tramo señalado?* A partir de eso, se estipularon una serie de objetivos sobre la base de los cuales conocer las condiciones del suelo, determinar el estado del talud y comparar el comportamiento logrado con la aplicación de cada una de las alternativas de refuerzo. En línea con este análisis, también se incluyó una

comparación económica para determinar la alternativa más rentable en términos de inversión y nivel de reposición. Esta introducción tiene como objetivo presentar al lector la relevancia del problema y el enfoque general del estudio antes de abordar los análisis específicos. De esta manera, se establece un contexto que hace posible la comprensión del desarrollo técnico realizado en la composición.

II. Planteamiento del problema

El problema del control de la erosión por lluvias intensas de los taludes alcanza una enorme relevancia en las áreas con un relieve accidentado y suelos poco cohesivos, donde se genera el peligro para la seguridad de las personas y las infraestructuras colindantes. Se pone de manifiesto, por ejemplo, en los países como Japón, Estados Unidos y Francia, donde las tormentas de lluvias fuertes han causado deslizamientos de tierra y bloqueos de ríos con grandes evacuaciones por la fuerza y la rapidez de estos fenómenos. (The Guardian, 2018)

En el Perú, los deslizamientos de tierra han aumentado por la fuerte erosión causada por la lluvia, la topografía andina y la mala gestión del uso del suelo. Estos factores degradan las laderas, aumentan la pérdida de suelo y la inestabilidad de taludes, lo que afecta carreteras y asentamientos. Estudios recientes muestran que la intensidad y distribución de lluvias elevan el potencial de inestabilidad, lo que representa un problema importante para la gestión del riesgo y la planificación territorial (Gutierrez Lope & Sabino Rojas, 2022).

En Cusco, Perú, la estabilización de taludes es un problema frecuente porque faltan cunetas de coronación durante la temporada de lluvias. Los tipos de erosión más comunes en la región son la erosión laminar y la erosión en surcos. La falta de plantaciones que protejan las laderas y el impacto de las gotas de lluvia aumentan el riesgo de deslizamiento de tierra y pérdida de suelo. Para reducir este problema, se recomienda sembrar barreras vivas, construir terrazas y proteger las laderas con plantaciones (Gobierno Regional Cusco, 2023).

El talud que se analiza está en Chuquicahuana, en el distrito de Checacupe, provincia de Canchis, departamento de Cusco. En la temporada de lluvias, ocurren derrumbes frecuentes, lo que es un problema porque está en una vía principal en el kilómetro 163+000. Estos deslizamientos interrumpen la comunicación con las comunidades que dependen de la carretera, que va desde el puente Chuquicahuana en la ruta CU-117, conecta con la PE-3S (Cusco) y llega a Occopata, Yaurisque, Abra Ranraccasa, Paruro, Dv. Cusibamba, Dv. Colcha, Accha, Pillpinto, Acos, Acomayo, Sangarara y vuelve a conectar con la PE-3S en Chuquicahuana.

En el pasado, la estabilización de taludes se realizaba principalmente con métodos tradicionales como muros de contención, terrazas, anclajes, drenajes profundos, concreto lanzado y estructuras rígidas de soporte. Aunque estos métodos son efectivos, suelen ser costosos, requieren mucha intervención en el terreno y a menudo alteran el entorno natural. Hoy en día, la ingeniería ha adoptado soluciones más flexibles y eficientes usando geosintéticos, que refuerzan el suelo, mejoran su comportamiento mecánico y aumentan la estabilidad del talud sin necesidad de estructuras pesadas o invasivas.

Entre estos materiales, la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V destacan por sus propiedades y usos específicos. La geomalla refuerza el suelo en dos direcciones, mejora la resistencia al corte gracias al interlock y ayuda a aumentar el factor de seguridad del talud al interceptar posibles superficies de falla. En cambio, la Geocelda GW20V estabiliza el terreno al confinar el suelo en tres dimensiones, controla la erosión y distribuye las cargas de forma uniforme. Ambas ofrecen ventajas como instalación rápida, alta durabilidad, buena relación costo-beneficio y adaptabilidad a terrenos irregulares. Sin embargo, cada una refuerza el suelo de manera diferente y su rendimiento depende del tipo de falla y de las características del lugar.

El Ministerio de Transporte y Comunicaciones, a través de PROVIAS Nacional y las empresas concesionarias, atendió 1,201 emergencias causadas por huaicos, deslizamientos, derrumbes y erosiones en distritos de 138 provincias de 22 departamentos. Estos eventos aislaron a varias poblaciones y afectaron el transporte y los medios de vida. Para responder, se usó maquinaria pesada y personal técnico capacitado para restablecer el tránsito y manejar las emergencias de manera adecuada (INDECI, 2023).

La región Cusco tiene una geodinámica activa debido a su topografía compleja, clima variable y diferentes condiciones geológicas. Estas características hacen que ocurran con frecuencia movimientos de masa, como deslizamientos, derrumbes y caídas de rocas, que afectan directamente a los centros poblados, las carreteras y las áreas agrícolas. Por eso, el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET) ha realizado varios estudios para identificar y evaluar las zonas más vulnerables a estos fenómenos (Vilchez M., 2015).

El análisis de antecedentes internacionales, nacionales y regionales muestra que, durante el periodo de que se realizaron las investigaciones, sigue existiendo una brecha de conocimientos sobre el análisis comparativo entre la geomalla coextruida y la Geocelda GW20V para la estabilización de taludes. Aunque hay estudios que demuestran la efectividad individual de estos geosintéticos, la mayoría de hicieron en contextos geológicos diferentes y se enfocaron en aumentar el factor de seguridad, sin realizar un análisis técnico y económico comparativo completo. Además, a nivel regional y local, no hay investigaciones que evalúen el desempeño de ambos sistemas ante fallas traslacionales en suelos granulares según los criterios de norma CE.020. Esto justifica la necesidad de la presente investigación.

Figura 1.

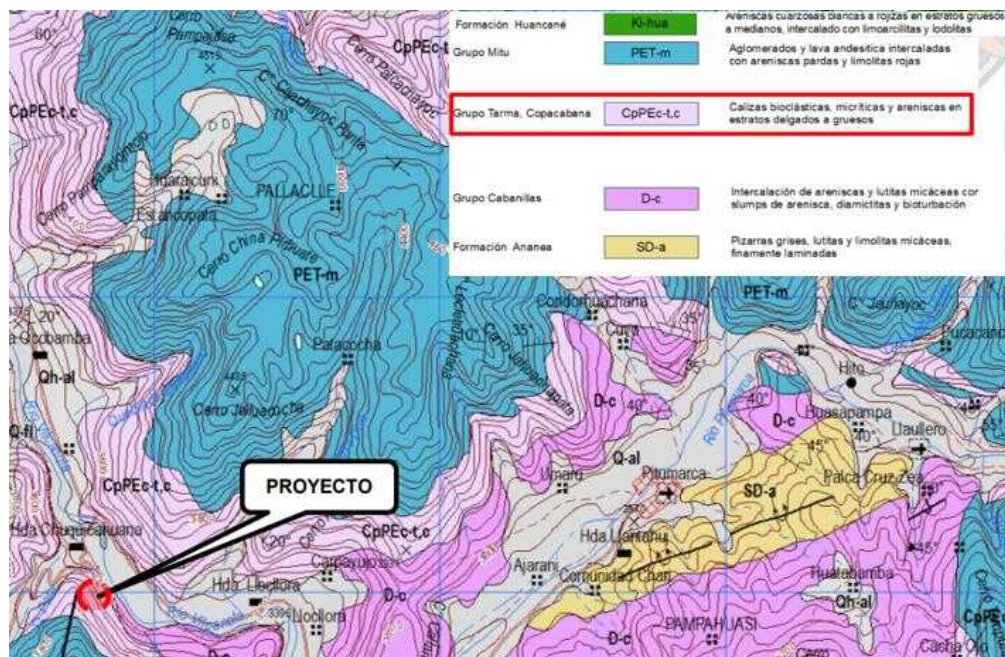
Deslizamiento de talud en el sector Chuquicahuana



Nota. Zona de estudio del proyecto de investigación.

Figura 2.

Geología Regional



Nota. Adaptado de *Estudio de estabilidad de taludes* (p.11) por Jefferson Chara, 2025.

2.1. Descripción y formulación del problema

2.1.1. Problema general

- ¿Qué Geosintético en términos técnicos - económicos es el más recomendable entre Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, para la estabilización de talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?

2.1.2. Problemas específicos

- **P.E.1.** ¿Qué propiedades mecánicas presenta el talud natural antes de la estabilización con Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?
- **P.E.2.** ¿Cuál es el factor de seguridad natural según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), del talud existente entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?
- **P.E.3.** ¿Al usar Geocelda GW20V para la estabilización de taludes cuanto será el F.S. (factor de seguridad) según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?
- **P.E.4.** ¿Al usar Geomalla Coextruida para la estabilización de taludes cuanto será el FS según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?
- **P.E.5.** ¿Cuál de los dos Geosintéticos propuestos para la estabilización de taludes es más económico entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024?

2.2. Objetivos

2.2.1. *Objetivo general*

- Evaluar el Geosintético en términos técnicos - económicos, cual es más recomendable entre Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, para la estabilización de talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

2.2.2. *Objetivos específicos*

- **O.E.1.** Verificar las propiedades mecánicas que presenta el talud natural antes de la estabilización con Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **O.E.2.** Verificar el factor de seguridad natural según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), del talud existente entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **O.E.3.** Evaluar la Geocelda GW20V para la estabilización de taludes cuanto será el F.S. según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **O.E.4.** Evaluar la Geomalla Coextruida para la estabilización de taludes cuanto será el FS según la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental -

ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

- **O.E.5.** Comparar los Geosintéticos propuestos para la estabilización de taludes, cual es más económico entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

2.3. Justificación e importancia

2.3.1. Justificación teórica

Esta investigación tiene una justificación teórica porque permite comprobar los fundamentos de la mecánica de suelos y la teoría de estabilidad de taludes basadas en el equilibrio límite. Se utiliza el método de Janbu para analizar superficies de falla no circulares en suelos granulares. Además, se verifica si los criterios de la norma CE.020 para evaluar el factor de seguridad en condiciones estáticas y pseudoestáticas se cumplen al comparar estos casos con la aplicación de sistemas de refuerzo con geosintéticos.

De igual forma, este estudio permite comparar y, si corresponde, cuestionar algunos postulados teóricos que consideran que los sistemas de refuerzo bidimensionales (geomallas) y tridimensionales (geoceldas) tienen el mismo desempeño. Los resultados muestran que su comportamiento estructural varía según las condiciones geotécnicas, el tipo de falla principal y el mecanismo de interacción entre el suelo y el refuerzo.

En conclusión, esta investigación aporta conocimiento teórico al realizar un análisis comparativo entre la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V. Se consideró no solo el aumento del factor de seguridad, sino también el comportamiento mecánico del talud y la eficiencia técnica y económica.

2.3.2. *Justificación metodológica*

La investigación tiene justificación metodológica porque ofrece un procedimiento sistemático y replicable para comparar la estabilidad de taludes reforzados con geosintéticos, usando un enfoque no experimental. Además, utiliza instrumentos técnicos validados, como ensayos de laboratorio, levantamiento topográfico, estudios geofísicos y modelación numérica con el software *Geostru Slope*, junto con el análisis económico en Delphin Express. Esta metodología asegura resultados objetivos, confiables y útiles para condiciones geotécnicas similares.

2.3.3. *Justificación técnica*

Esta investigación ofrecerá información detallada sobre las potencialidades y capacidades técnicas de los materiales Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, así como datos de campo del estudio de suelos de talud para su estabilización. Al comparar estos materiales, se podrán optimizar los diseños de infraestructuras y mejorar la seguridad, durabilidad y la eficiencia económica en los proyectos de estabilización de taludes.

2.3.4. *Justificación social*

Comparar el uso de la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V para estabilizar taludes tiene implicaciones técnicas, económicas y sociales. Este estudio busca ofrecer soluciones que mejoren la seguridad pública y protejan la infraestructura vial, para lograr un bienestar social más amplio y duradero.

2.3.5. *Justificación por viabilidad*

La viabilidad del proyecto que compara el uso de Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V para estabilizar taludes depende de contar con los recursos técnicos, económicos y operativos necesarios, así como de un cronograma claro. Los resultados de este estudio serán útiles para futuros proyectos de estabilización de taludes.

2.4. Hipótesis

2.4.1. *Hipótesis general*

- La Geocelda GW20V presenta un mejor desempeño que la Geomalla Coextruida en la estabilización del talud, considerando el factor de seguridad y el costo económico, para la estabilización de talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

2.4.2. *Hipótesis específicas*

- **H.E.1.** El talud natural presenta propiedades mecánicas que no cumplen con los parámetros mínimos requeridos para garantizar su estabilidad sin el uso de Geosintéticos, lo cual, se necesitará estabilizar mediante Geomalla Coextruida o Geocelda GW20V entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **H.E.2.** El factor de seguridad natural del talud existente es inferior a 1.5 del coeficiente estático e inferior a 1.25 del coeficiente dinámico, indicando un alto riesgo de deslizamiento sin la estabilización adecuada con Geosintéticos para la estabilización del talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **H.E.3.** El uso de Geocelda GW20V incrementa el factor de seguridad del talud a un valor superior a 1.5 del coeficiente estático y a un valor superior a 1.25 del coeficiente dinámico, cumpliendo con la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes) para la estabilidad del talud, entre las progresivas km 161+956 hasta km

162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

- **H.E.4.** La utilización de Geomalla Coextruida incrementa el factor de seguridad del talud a un valor superior a 1.5 del coeficiente estático y un valor superior a 1.25 del coeficiente dinámico, en conformidad con la norma CE.020 (Estabilización de suelos y taludes), para la estabilización del talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.
- **H.E.5.** Existe una diferencia significativa en el costo de estabilización del talud entre el uso de Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V para la estabilización del talud entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe – Cusco, 2024.

2.5. Variables

- **Variables independientes:** El tipo de geosintético usado para estabilizar el talud incluye la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V. Sus características estructurales afectan el comportamiento mecánico del suelo.
- **Variables dependientes:** El factor de seguridad (F.S.) de talud es el parámetro principal para medir su estabilidad. Se obtiene a través de análisis estático y dinámico. Este índice muestra directamente el nivel de seguridad y estabilidad según el tipo de geosintético usado como refuerzo: Geomalla Coextruida o Geocelda GW20V.

Tabla 1.*Operacionalización de Variables*

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida	Escala de medición	
Variable Independiente: Geosintéticos	Producto polimérico usado en ingeniería para mejorar suelos mediante refuerzo, separación, filtración, drenaje o barrera hidráulica (Abramson, 2002)	Elección del material de refuerzo entre dos alternativas específicas para su modelación e implementación en el diseño de estabilización.	Geomalla Coextruida	Configuración estructural (Bidimensional - 2D)	-	Nominal	
				Mecanismo de refuerzo (Tracción)	kg/cm	Razón	
				Tipo de polímero (Polipropileno - PP)	-	Nominal	
			Geomalla GW20V	Configuración estructural (Tridimensional - 3D)	-	Nominal	
				Mecanismo de refuerzo (Confinamiento celular)	kg/cm	Razón	
				Tipo de polímero (HDPE)	-	Nominal	
Variable Dependiente: Factor de Seguridad (F.S.)	El factor de seguridad es la relación entre la resistencia al corte disponible y el esfuerzo cortante movilizado en el suelo para prevenir la falla. (Braja M., Principles of Foundation Engineering, 2011)	Valor calculado que cuantifica el nivel de estabilidad del talud bajo diferentes condiciones de análisis, tras la incorporación de cada geosintético.	Estabilidad Estática	Factor de Seguridad	(F.S. ≥ 1.50)	Razón	
				Estabilidad Dinámica	Factor de Seguridad	(F.S. ≥ 1.25)	Razón
					Coeficientes sísmicos aplicados (k_h, k_v)	-	Nominal
			Comportamiento del Sistema Reforzado	Tipo de superficie de falla crítica identificada	kg/cm ²	Razón	
				Costo	Costo directo	Soles (s/)	Razón
				Gastos generales	Soles (s/)	Razón	

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

3.1.1. A nivel internacional

(Jimbo Yépez & Mesa Lavista, 2022) Desarrollaron la investigación “Modelación computacional para la estabilización de un terraplén reforzado con geomallas”. El objetivo de este estudio fue crear un modelo computacional para evaluar y mejorar la estabilidad de un terraplén ubicado en el kilómetro 12 de la vía a Daule, en Guayaquil, Ecuador. Se realizó un análisis de estabilidad usando modelación numérica con el software GeoStudio (módulo Slope/W) y el método de equilibrio límite de Morgenstern-Price. El terraplén fue el objeto de estudio y se caracterizó a través de un estudio geotécnico que incluyó sondeos y pruebas de laboratorio para determinar los parámetros de suelo, como grava arcillosa y arcilla blanda. Se calcularon los factores de seguridad (FS) en condiciones estáticas y dinámicas, considerando la sismicidad, y se diseñó un refuerzo con geomallas biaxiales Fortgrid. Los resultados iniciales mostraron que el terraplén era inestable ($FS=0.664$ en estático y $FA=0.602$ en dinámico). Sin embargo después de instalar las geomallas, el FS aumentó en 1.590 en estático y 1.651 en dinámico, cumpliendo con las normas. Se concluye que reforzar el terraplén con geomallas es una solución técnica y económica que mejora la seguridad y reduce los asentamientos diferenciales.

(Torres Peña, 2021) Desarrolla la investigación “Evaluación experimental del efecto de disipación de esfuerzos producido por geoceldas sobre suelos blandos”, Trabajo de grado

de maestría en la Universidad Nacional de Colombia; el objetivo fue evaluar cómo las geoceldas de polietileno de alta densidad (HDPE) ayudan a disipar esfuerzos en suelos blandos, mediante un enfoque aplicativo y descriptivo. Se usaron modelos de laboratorio, con ensayos de carga en arcilla y bloques de EPS de distintas densidades, junto con modelos numéricos en elementos finitos usando PLAXIS 2D. Los resultados mostraron que la capacidad portante del sistema con geocelda fue entre 1.45 y 2.45 veces mayor que sin refuerzo, y el módulo de elasticidad de la capa granular mejoró entre 1.25 y 2.8 veces. Se concluye que las geoceldas son más efectivas en subrasantes muy blandas, donde se lograron las mayores mejoras en rigidez, resistencia y reducción de asentamientos.

(Marín, Oyola, Ordoñez, & Aguirre, 2020) Realizaron el artículo científico “Aplicación de programas analíticos e informáticos sobre estabilización de taludes en el cerro pata grande del cantón Piñas” Investigación realizada para Universidad Técnica de Machala, Ecuador; el objetivo de este estudio fue analizar tres opciones para estabilizar taludes en el Cerro Pata Grande, junto al hospital Luis Moscoso Zambrano en Piñas, Ecuador, y así determinar la solución más adecuada. Se usó una metodología aplicada que incluyó revisión bibliográfica, trabajo de campo con perforaciones y pruebas geotécnicas (compresión simple, granulometría y límites de Atterberg), modelado topográfico con Global Mapper y Civil 3D, y análisis de estabilidad estática con Geo-Slope usando los métodos de Fellenius, Bishop, Janbu, Morgenstern-Price y Spencer. Los resultados mostraron que construir bermas es la opción más viable desde el punto de vista técnico y económico, ya que los factores de seguridad superan 1.50 según la normativa ecuatoriana, aunque se detectó erosión superficial por lluvias. Se concluye que el talud es estable, pero es necesario implementar bermas con pendiente 0.8H:1V, un sistema de drenaje superficial e hidrosiembra para controlar la erosión y proteger el área del hospital.

(Hernández Chaverra & Tamayo Ruiz, 2019) Desarrollaron la investigación “Análisis de estabilidad del talud y obras de contención necesarias para el diseño y construcción de una vía de orden secundario en el municipio De Dabeiba – Antioquia”, Trabajo de grado para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad Cooperativa de Colombia; el objetivo de este estudio fue diseñar una vía secundaria en Dabeiba (Antioquia) a partir del análisis de estabilidad de taludes y el diseño del pavimento. Para ello, se realizó una investigación aplicada que incluyó la recolección de datos geotécnicos, ensayos de laboratorio para determinar la resistencia del suelo y el modelado de estabilidad con el software Slide® usando métodos de equilibrio límite. Los resultados mostraron que dos de los tres perfiles analizados eran estables, pero el perfil 3 necesitó obras de contención, como un muro con pilas y anclajes, para lograr factores de seguridad adecuados. También se diseñó el pavimento flexible con el método AASHTO 93. Se concluye que, con las obras de estabilización propuestas, es posible construir una vía segura y funcional para un periodo de diseño de 10 años.

(Pineda Ruiz, 2019) Realizó una investigación denominada: “Evaluación geológica, geomecánica y consideraciones para el prediseño de la estabilidad del talud del Santuario Blanca Estrella del Mar en el cerro de Olón, Santa Elena-Ecuador”. Tesis para obtener el título profesional de ingeniero en geología en la Escuela Superior Politécnica del Litoral de Ecuador; Esta tesis evaluó la estabilidad geomecánica del acantilado donde se encuentra el Santuario Blanca Estrella del Mar en Olón, Ecuador, con el fin de proponer un prediseño de estabilización. El estudio fue de tipo aplicado y descriptivo-analítico. La metodología se dividió en cuatro fases: recopilación de información, trabajo de campo (geología, geofísica con SEV y tomografía, y fotogrametría con dron), caracterización geomecánica usando las clasificaciones RMR, SMR y CSMR, y evaluación de la susceptibilidad al desprendimiento y del factor de seguridad con el método de Morgenstern-Price. Los resultados mostraron que

el macizo rocoso tiene una calidad de media a baja, una susceptibilidad al desprendimiento de muy alta a alta y factores de seguridad críticos (por ejemplo, 0.907), lo que confirma su inestabilidad. Se concluye que la infiltración de agua y la geometría del talud son factores clave, y se recomienda de manera urgente implementar un sistema integral de estabilización que contemple anclajes, drenaje y hormigón proyectado.

3.1.2. A nivel nacional

(Flores Esteban, 2023) Desarrolló un trabajo de investigación titulado “Evaluación del empleo de las geoceldas para la estabilización de taludes”, Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad Peruana lo Andes; el objetivo de este estudio fue evaluar cómo las geoceldas ayudan a estabilizar taludes en la carretera Quichuas-Mayocc, en Huancavelica. Se llevó a cabo una investigación aplicada, de nivel correlacional y diseño experimental, usando el software SLIDE para modelar taludes reforzados con geoceldas de distintos tamaños y longitudes de malla. Los resultados mostraron que las geoceldas aumentan de manera significativa los factores de seguridad estático y pseudo-estático, superando los valores mínimos requeridos. Las celdas grandes de 475 mm x 508 mm y 13.5 m de longitud ofrecieron los mejores resultados. En conclusión, las geoceldas son una solución eficaz para estabilizar taludes en suelos tipo GM.

(Carrera Rojas, 2022) Desarrolló un trabajo de investigación titulado “Análisis comparativo de la influencia del sistema Geoceldas Step con la aplicación de métodos Bishop, Janbú en los parámetros de la estabilización de taludes en la represa Gallito Ciego – Cajamarca, 2022”, Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad Privada de Norte; el objetivo de este estudio fue comparar el sistema Geoceldas Step con los métodos Bishop y Janbú y con el sistema tradicional, evaluando costos, tiempo e impacto ambiental en la estabilización de taludes de la represa Gallito Ciego (Cajamarca, 2022). Se utilizó una metodología comparativa, cuantitativa, no experimental y explicativa.

Los resultados muestran que el método Janbú es más preciso ($FS=1.34$) y que el sistema Geoceldas reduce los costos en un 34%, el tiempo de instalación entre 25 y 30%, y disminuye el impacto ambiental en comparación con el método tradicional. Se concluye que las Geoceldas Step son una opción técnica y económica más eficiente para estabilizar taludes en proyectos de infraestructura hidráulica.

(Quispe Astete, 2020) Desarrolló un trabajo de investigación titulado “Análisis de las condiciones de estabilidad física para sistemas de cobertura con geosintético en el cierre de minas”, Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad Nacional de Ingenierías; el objetivo del estudio fue proponer criterios y herramientas gráficas para diseñar y analizar la estabilidad física de sistemas de cobertura con geosintéticos, como geomembranas y GCL, en el cierre de depósitos mineros. Se usó una metodología aplicada que combinó ensayos de corte directo a gran escala en laboratorio para caracterizar la resistencia de las interfaces, junto con análisis paramétricos determinísticos y probabilísticos mediante simulación Monte Carlo en diferentes condiciones de servicio. Los resultados principales incluyeron parámetros de resistencia para las interfaces críticas, así como matrices de condiciones de estabilidad y ábacos de diseño basados en índices de confiabilidad. Se concluye que estas herramientas facilitan un diseño preliminar más eficiente y confiable de coberturas con geosintéticos en proyectos mineros.

(Porras Zamora, 2021) Desarrolló un trabajo de investigación titulado “La estabilidad de talud en la vía Moyaccasa – Pulcay con Geoceldas como alternativa de estabilización distrito Huaccana, Chincheros, Apurímac 2021”, Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad César Vallejo – Lima; el objetivo de este estudio fue identificar las ventajas de las geoceldas como alternativa para estabilizar el talud inestable en la vía Moyaccasa-Pulcay (progresiva 12+100 a 12+180) y así asegurar su transitabilidad. Se realizó una investigación tecnológica de tipo descriptivo-explicativo y

diseño no experimental, utilizando el software Slope (v.2018) para analizar la estabilidad con métodos de equilibrio límite, junto con estudios topográficos y geotécnicos de campo y laboratorio. Los resultados indicaron que el talud en su estado natural tenía factores de seguridad ($FS=1.21$ estático; 1.01 pseudoestático) por debajo de lo exigido por la norma RNE CE.020. Al aplicar muros de gravedad de geoceldas, los valores de FS aumentaron a 1.59 (estático) y 1.27 (pseudoestático), cumpliendo con la normativa. Se concluye que las geoceldas son una solución ventajosa, económica, fácil de instalar y duradera, efectiva para estabilizar el talud crítico y mantener la transitabilidad de la vía.

(Vergara Flores, 2018) Desarrolló la tesis “Estabilización de talud por tres métodos: gaviones, Geomalla y muro de contención en el centro poblado San Juanito Alto distrito de Guadalupito - Virú – La Libertad”, Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad San Pedro – Chimbote; el objetivo de esta tesis fue encontrar la mejor opción para estabilizar los taludes en el Centro Poblado San Juanito Alto (La Libertad, Perú), comparando tres métodos: gaviones, geomalla y muro de contención. El estudio fue de tipo aplicativo y se realizó en campo, con levantamiento topográfico, calicatas para analizar el suelo y un análisis geotécnico, seguido por el diseño y cálculo de cada alternativa. Los resultados indicaron que la geomalla tuvo el costo directo más alto (S/. 311,343.38), pero brinda mayor estabilidad y beneficios ambientales. El muro de contención resultó ser la opción más económica (S/. 173,779.28) y los gaviones tuvieron un costo intermedio (S/. 279,005.02). Se concluye que la geomalla es la opción más segura y sostenible para las zonas con mayor pendiente y riesgo, mientras que en áreas con suficiente espacio, los muros o gaviones pueden ser alternativas viables por su menor costo.

3.1.3. A nivel regional y local

(Cabrera Ubillus & Falcon Hurtado, 2019) "Diseño de un muro de suelo reforzado por problemas de inestabilidad de taludes en el tramo km 163+960 al km 164+024 IIRSA

sur tramo 2 - Cusco, 2019", Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad César Vallejo – Lima; el objetivo de este estudio fue diseñar un muro de suelo reforzado para solucionar problemas de inestabilidad de taludes en el tramo km 163+960 al 164+024 de la IIRSA Sur, Cusco. Se utilizó una metodología aplicada, con un enfoque cuantitativo, nivel explicativo y un diseño no experimental y transversal. Con base en estudios geotécnicos previos (suelos SP-SM, $\phi = 32^\circ$, $\gamma = 1.83 \text{ t/m}^3$), se realizó el prediseño y modelado en el software MACSTAR2000, verificando la estabilidad global, el deslizamiento, el vuelco y la capacidad portante según las normativas FHWA-NHI-10-024 y RNE E030. Los resultados mostraron factores de seguridad superiores a los mínimos requeridos tanto en condiciones estáticas como sísmicas. Se concluye que el diseño es técnicamente viable, cumple con los parámetros normativos para prevenir deslizamientos y que las características geotécnicas del suelo son clave para el dimensionamiento y refuerzo de la estructura. El presupuesto estimado para la ejecución fue de S/ 472,270.27.

(Rosales Pillco, 2018) "Análisis de la variabilidad de costos unitarios en los métodos de estabilización de talud del tramo km 244+300 – km 244+500 de la carretera interoceánica, distrito de Camanti, provincia de Quispicanchi - Cusco ", Tesis para obtener el título profesional de ingeniero civil en la Universidad Alas Peruanas – Cusco; el objetivo fue estudiar cómo varían los costos unitarios de diferentes métodos para estabilizar taludes en el tramo km 244+300 a 244+500 de la Carretera Interoceánica Sur en Cusco, Perú. Usando un enfoque descriptivo-correlacional y no experimental, se evaluó la estabilidad con el software Slide de Rocscience y se compararon los métodos de anclajes, pilotes, muros de contención y banquetas. Los resultados muestran que los anclajes ofrecen el mayor factor de seguridad (≥ 1.5) y el costo directo más bajo (US\$ 25,258.49), por lo que son la opción más viable tanto técnica como económicamente. Se concluye que, en este sector, los anclajes

priorizan la seguridad y la rentabilidad. Se recomienda evaluar al menos tres alternativas, prestando especial atención al análisis económico.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Talud

El talud es la pendiente que se diseña para el terreno lateral de una carretera, ya sea en zonas de corte o de terraplén. Se define como la tangente del ángulo entre la superficie del terreno y una línea horizontal teórica. En los tramos en corte, la forma del talud depende de las propiedades del suelo o de la roca, la altura y las condiciones de drenaje, tanto superficial como subterráneo. Estos factores deben analizarse con estudios geotécnicos y geológicos. Es importante considerar estos aspectos para asegurar la estabilidad del talud, sobre todo en áreas con materiales inestables o fallas, y así elegir el diseño más adecuado ([MTC], 2018).

Partes de un Talud

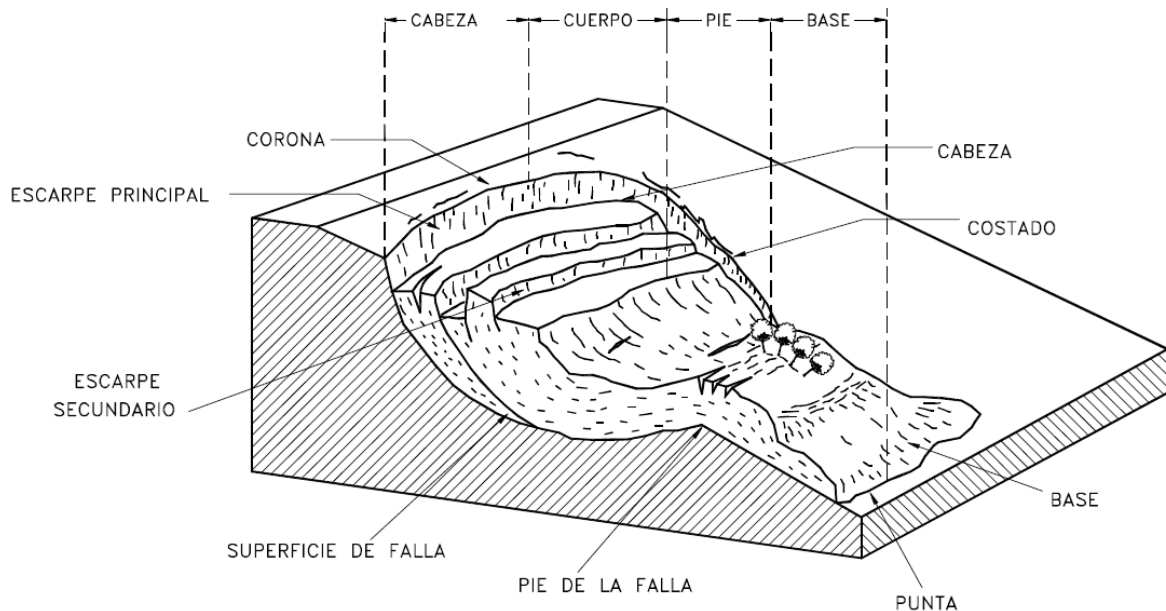
La forma y estabilidad de un talud dependen de identificar con precisión sus componentes geométricos y geotécnicos principales. Estos elementos no solo definen su morfología, sino que determinan su comportamiento mecánico y el nivel de riesgo de fallas, como deslizamientos o vuelcos. Las partes esenciales a analizar son la base, la cima, la altura total, la altura del nivel freático y el ángulo de la pendiente. Una correcta caracterización de estos factores permite evaluar la resistencia del suelo o roca, la presión de poros y las fuerzas actuantes, fundamentales para cualquier diseño o intervención de estabilización (Hernández Chaverra & Tamayo Ruiz, 2019).

Figura 3.*Partes de un talud*

Nota. Adaptado de *Análisis De Estabilidad Del Talud Y Obras De Contención Necesarias Para El Diseño Y Construcción De Una Vía De Orden Secundario En El Municipio De Dabeiba-Antioquia* (p. 10) por A. Hernández; Y. Tamayo, 2019.

Figura 4.

Nomenclatura de un Deslizamiento



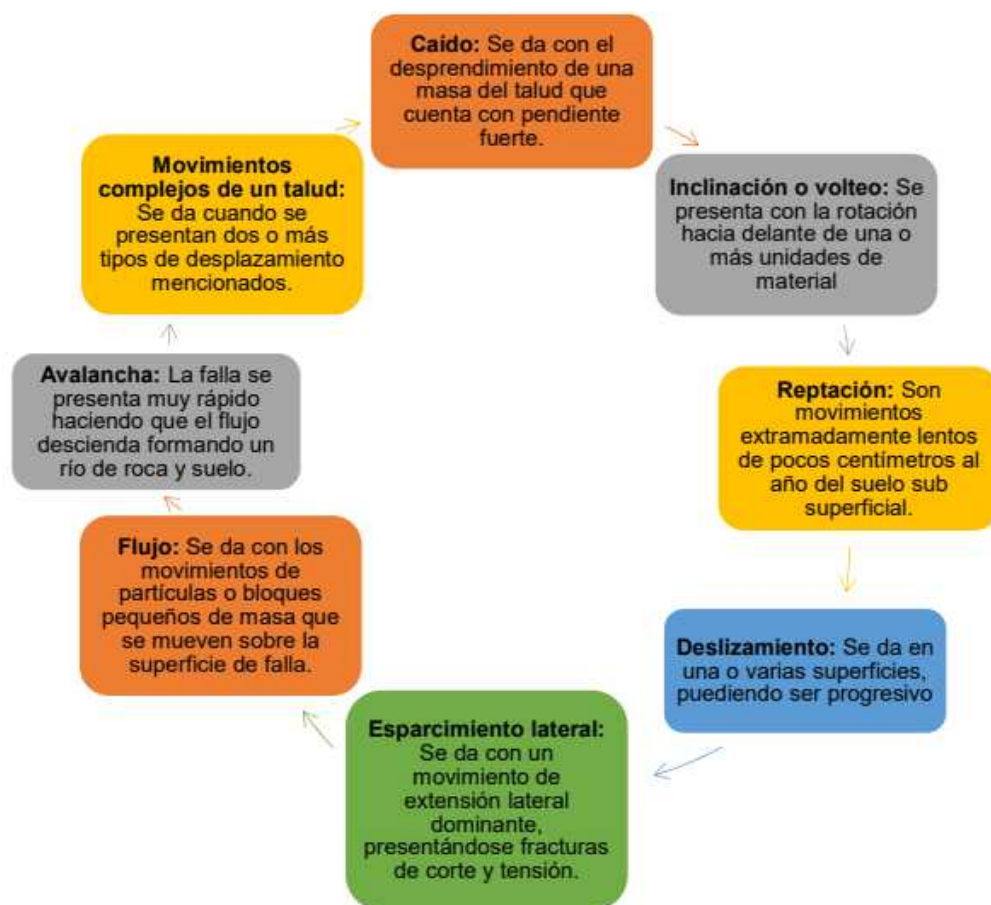
Nota. Adaptado de *Deslizamientos Y Estabilidad De Taludes En Zonas Tropicales* (p. 3) por J. Suarez, 1998, Ingeniería de Suelos Ltda. Editorial.

3.2.2. Clasificación de los movimientos en masa

Los movimientos en masa son procesos geodinámicos, lentos o rápidos, donde el suelo, la roca o ambos se desplazan cuesta abajo por la fuerza de gravedad. Este proceso se agrava por agentes erosivos, especialmente el agua, que al infiltrarse reduce la resistencia del material y disminuye su estabilidad. La combinación de gravedad y agua provoca deslizamientos, flujos o reptaciones, lo que representa un riesgo geotécnico importante en laderas y taludes, sobre todo en zonas con lluvias intensas o suelos saturados, en la Figura 5 que se presenta ocho clasificaciones de movimientos de masa y una breve descripción de cada una de ellas, la clasificación que corresponde a nuestro estudio es el *deslizamiento*, debido principalmente al tipos de suelo que se presenta en el sector Chuquicahuana (John Soto, 2011).

Figura 5.

Movimiento de masas



Nota. Adaptado de *Protección Y Estabilización De Taludes Para Evitar Deslizamientos* (p. 8-15) por J. John Soto, 2011.

Tabla 2.

Coefficientes de seguridad para el análisis de estabilidad de taludes

Normativa	Talud temporal		Talud permanente	
	Estática	Sísmica	Estática	Sísmica
AASHTO LRFD	1.33 – 4.53	1.1	1.33 – 1.53	1.1
NAVTAC-DM7	1.30 – 1.25	1.20 – 1.15	1.5	1.20 – 1.15
FHWA-NHI-11-0.32	-	1.1	-	1.1
CE.020	-	-	1.5	1.25

Nota. Fuente (Valiente Sanz, Sobrecases Martí, & Diaz Orrego, 2016)

3.2.3. Geocelda

Una geocelda es una estructura modular tridimensional hecha de tiras de polietileno de alta densidad (PEAD) texturizadas y perforadas, unidas para formar una red de celdas conectadas. Cuando se llena con suelo, agregados, hormigón u otros materiales, ayuda a mantener el relleno en su lugar y mejora su resistencia y estabilidad. Se usa en aplicaciones geotécnicas como soporte de carga, protección de taludes y canales, y muros de contención. Es una alternativa eficiente, duradera y sustentable a los métodos tradicionales (Presto GeoSystems, 2020).

Tabla 3.

Clasificación de Geocelda según el tamaño de las celdas

Denominación	Celda pequeña (GW20V)	Celda mediana (GW30V)	Celda grande (GW40V)	
Longitud nominal	224 x 259 mm	287 x 320 mm	267 x 330 mm	475 x 508 mm
Área nominal	289 cm ²	460 cm ²	440 cm ²	1206 cm ²
Celda por m ²	34.6	21.7	N/A	8.3
Profundidades nominales	75 mm (3"), 100 mm (4"), 150 mm (6") y 200 mm (8") para todas las celdas			

Nota. Adaptado de *Sistema de Estabilización de Suelos* (p. 11) por PRESTO GEOSYSTEMS, 2020.

El proceso constructivo comienza preparando y compactando la superficie del talud, quitando la vegetación y los materiales sueltos. Después, se despliegan las secciones GEOWEB® sobre el talud, se expanden, se alinean y se conectan con las llaves ATRA®. Estas se fijan al terreno con anclajes o tendones ATRA®, sobre todo en pendientes pronunciadas. Luego, se rellenan las celdas con el material elegido, como tierra vegetal, agregado o concreto, en capas que se compactan poco a poco para asegurar la estabilidad. Al final, se revisa que todo esté uniforme y se hacen los acabados para facilitar el crecimiento de la vegetación o proteger contra la erosión (Presto GeoSystems, 2020).

Figura 6.*Apertura de Geocelda*

Nota. Tomado de *Sistema de Estabilización de Suelos* (p. 11) por PRESTO GEOSYSTEMS, 2020.

Tabla 4.*Características Técnicas de la Geocelda GW20V*

Parámetro	Característica	Unidad	Valor
Identificación	Modelo comercial		GEOWEB GW20V
Material Base	Tipos de polímero		PEAD (Polímero de alta densidad)
Apertura de Celda	Área nominal (Área de confinamiento)	Cm ²	289
Altura de Celda	Altura de Confinamiento (a utilizar)	mm	150
Resistencia de la soldadura	Resistencia Mínima Típica	N	1400
Estructura	Configuración		Celular Tridimensional (3D)

Nota. Los datos de material base y área nominal provienen de *Sistema de Estabilización de Suelos* (p. 11) por PRESTO GEOSYSTEMS, 2020. Las alturas o profundidades de las celdas son variables, en este caso se está especificando el que se empleara en la investigación.

3.2.4. *Geomalla coextruida*

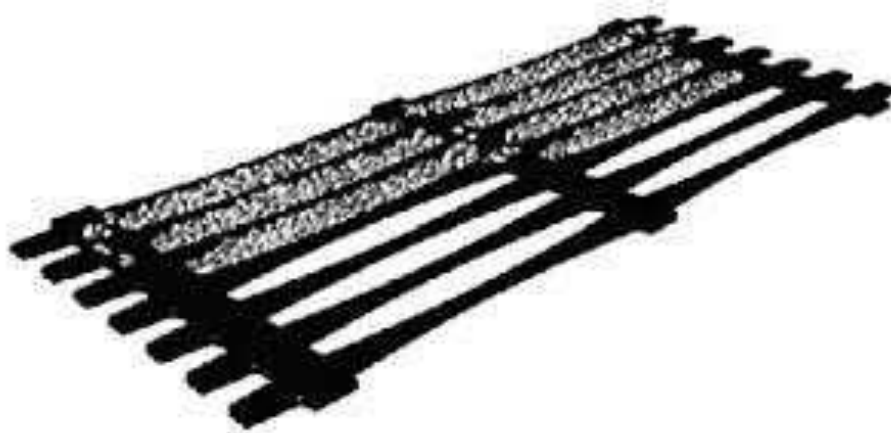
La geomalla coextruida es un material geosintético de refuerzo que forma parte de la familia de las geomallas. Se fabrica al extruir al mismo tiempo dos o más polímeros, como el polipropileno o el polietileno. Gracias a este proceso, la geomalla tiene una estructura plana con aberturas regulares y una alta resistencia a la tracción en sus principales direcciones. A diferencia de los geotextiles, su función principal es reforzar el terreno, mejorando la capacidad de carga y la estabilidad de taludes, terraplenes y muros de contención. La coextrusión permite unir las propiedades de distintos materiales, lo que mejora su durabilidad, resistencia química y comportamiento mecánico. Por eso, es especialmente útil en obras de ingeniería civil que necesitan materiales muy resistentes y con poca deformación a largo plazo (Ballester, Castro, & Gil, 2000).

Geomallas coextruida mono-orientadas

Las geomallas Coextruida mono-orientadas son materiales geosintéticos bidimensionales fabricados en polietileno de alta densidad (HDPE) mediante un proceso de extrusión y estiramiento unidireccional, que les otorga una estructura monolítica con aberturas elípticas para lograr una óptima trabazón con suelos granulares. Su principal característica es su elevada resistencia a la tracción en la dirección longitudinal, alcanzando capacidades de hasta aproximadamente 160 kN/m, junto con un alto módulo de rigidez. Además, son químicamente inertes y biológicamente resistentes, lo que asegura su durabilidad en condiciones ambientales adversas. En aplicación, funcionan análogamente al acero en el hormigón armado: mientras la geomalla absorbe los esfuerzos de tensión, el suelo soporta las compresiones, conformando así un sistema compuesto de suelo reforzado eficiente para muros de contención, terraplenes y diversas estructuras de estabilización geotécnica (Geosistemas PAVCO SA, 2009).

Figura 7.

Geomalla coextruida mono-orientadas



Nota. Tomado de *Manual de diseño con Geosintéticos* (p. 15) por Geosistemas PAVCO S.A, 2020, Zetta Comunicadores S.A.

Geomallas coextruida bi-orientadas

Las geomallas Coextruida bi-orientadas son materiales geosintéticos formados por una estructura bidimensional de polipropileno, caracterizada por su estabilidad química y uniformidad física. Su proceso de fabricación consiste en la extrusión inicial del material y su posterior estiramiento en las direcciones longitudinal y transversal, lo cual incrementa significativamente su resistencia a la tensión. Esta conformación genera una malla de aberturas regulares que proporciona un módulo de elasticidad elevado y una interacción más eficiente con las partículas del suelo. En el contexto del presente proyecto de investigación, estas propiedades resultan especialmente relevantes, ya que la geomalla actúa como un refuerzo estructural capaz de distribuir esfuerzos y limitar deformaciones en el talud ubicado entre las progresivas 161+956 y 162+056, zona donde se evidencia un comportamiento inestable que requiere confinamiento y soporte adicional (Geosistemas PAVCO SA, 2009).

Figura 8.*Geomalla Coextruida Bi-orientada*

Nota. Tomado de *Manual de diseño con Geosintéticos* (p. 16) por Geosistemas PAVCO S.A, 2020, Zetta Comunicadores S.A.

Las geomallas Coextruida bi-orientadas, gracias a sus nudos rígidos y elementos continuos, ofrecen una gran capacidad de confinamiento. Esto permite que se anclen bien al material del talud y mejoren la unión interna del suelo. Este comportamiento es especialmente importante en zonas donde hay riesgos por esfuerzos cortantes y desplazamientos superficiales, como en el tramo de la carretera CU-117 en Chuquicahuana. Al incluirlas en el diseño, se refuerza la estructura del talud y se mejora su estabilidad general, ya que ayudan a controlar las deformaciones y a redistribuir las cargas. Por eso, su uso es una opción técnica adecuada y eficaz para enfrentar los problemas de inestabilidad detectados, y contribuye a la sostenibilidad y seguridad de la vía (Geosistemas PAVCO SA, 2009).

3.2.5. Cunetas de coronación

Son canales que se construyen con la finalidad de interceptar y encauzar apropiadamente el agua que se desliza sobre la superficie, y de esta manera impedir el deterioro del terreno, básicamente en sectores con mucha pendiente o donde se ha realizado el corte del terreno para la construcción de estructuras, reservorios, unidad de captación, etc.

Las zanjas de coronación de un talud son empleadas para interrumpir y guiar apropiadamente el agua de las lluvias previniendo su acceso por el talud, asimismo la cuneta de coronación no se debería construirse próximo al borde superior del talud, para impedir deslizamientos.

La colocación y dimensiones de las cunetas pueden modificarse en concordancia a la topografía del sector y cálculo de los datos recolectados, de ahí que se advierte para generalmente una cuneta de mínimo de 50 centímetros de profundidad y 40 centímetros de ancho.

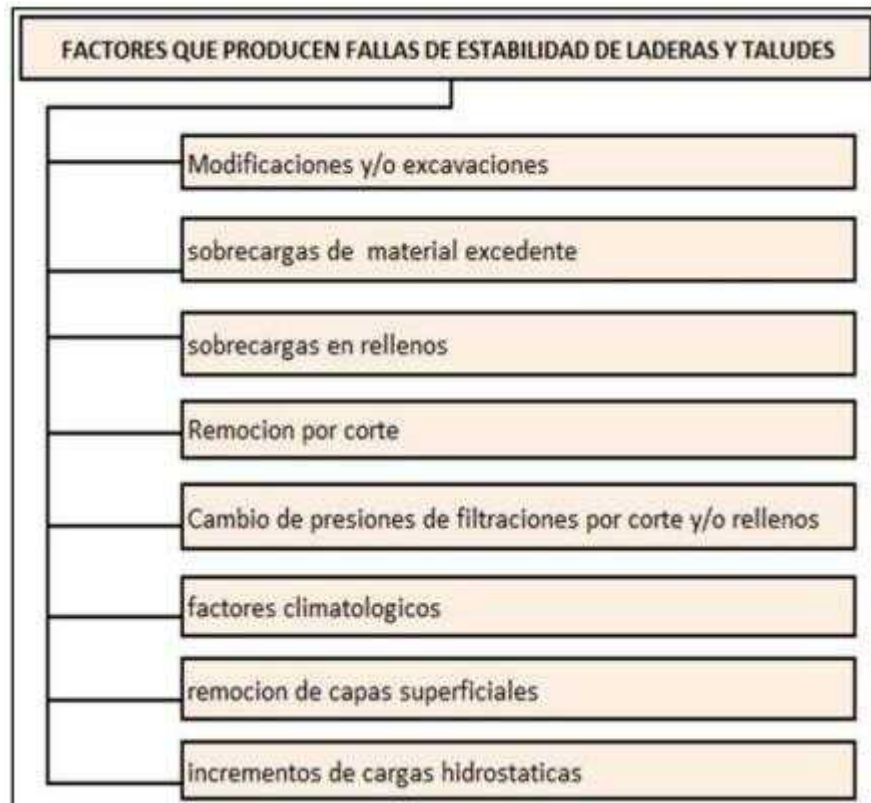
Es por ello que es recomendable que las zanjas de coronación sean completamente impermeabilizadas además de disponerse de una suficiente pendiente y asegurar un drenaje, así como un mantenimiento cada dos años aproximadamente para reparar algún corte o fisura que pudiera darse.

3.2.6. Factores que producen fallas de estabilidad de laderas y taludes.

Los factores que producen fallas de estabilidad en laderas y taludes resultan de la interacción entre condiciones naturales y acciones inducidas por el ser humano. Entre los factores naturales destacan la litología, la estructura geológica, la estratigrafía, la pendiente del terreno y las condiciones climáticas, especialmente la infiltración de lluvia, que incrementa las presiones de poros y reduce la resistencia al corte del suelo. Asimismo, los procesos de meteorización y la erosión superficial contribuyen al debilitamiento progresivo de los materiales. Por otro lado, las actividades antrópicas, como excavaciones, sobrecargas por rellenos, modificaciones de la geometría del talud y deficiencias en los sistemas de drenaje, alteran el equilibrio tensional del macizo y favorecen deslizamientos. La remoción de la cobertura vegetal y los cambios en las condiciones hidrológicas intensifican estos efectos. Un análisis integral de estos factores es fundamental para evaluar la estabilidad (De Matteis, 2003).

Figura 9.

Factores que producen fallas de estabilidad de ladera y taludes



Nota. Adaptado de *Estabilidad de taludes* (p. 8-15) por Álvaro De Matteis, 2003.

Modificaciones y/o excavaciones

Modificar la forma natural del terreno con cortes o excavaciones es común en proyectos viales, mineros o de construcción. Estas acciones pueden reducir el soporte lateral, aumentar la pendiente y reactivar fallas antiguas, lo que pone en riesgo la estabilidad del terreno. Por eso, el diseño y la ejecución deben cumplir normas que tomen en cuenta la geología local y la resistencia del suelo ([MTC], 2018).

Sobrecargas de material excedente

La acumulación de materiales como desechos o rellenos no controlados en la parte superior o en la ladera del talud aumenta las fuerzas gravitacionales y los esfuerzos cortantes, lo que reduce el factor de seguridad (De Matteis, 2003).

Sobre carga de rellenos

Cuando se aplican cargas estáticas o dinámicas, como las de estructuras, tráfico o almacenamiento, sobre rellenos artificiales, es importante que el material esté bien compactado y la cimentación sea adecuada. Si no es así, el aumento de carga puede causar asentamientos excesivos, fallas en la capacidad portante o deslizamientos en zonas débiles (Braja M., Principles of Foundation Engineering, 2011).

Remoción por corte

La eliminación de material en la base o pie del talud, ya sea por procesos naturales como la erosión fluvial o por actividades humanas como las excavaciones, reduce la resistencia al deslizamiento y puede causar fallas rotacionales o traslacionales (De Matteis, 2003).

Cambio de presiones de filtraciones por corte y/o rellenos

El régimen hidrogeológico puede cambiar cuando se hacen intervenciones en el terreno. Esto modifica los niveles freáticos, aumenta la presión de los poros y reduce la resistencia efectiva del suelo (De Matteis, 2003).

Factores climatológicos

Los agentes meteorológicos, como las lluvias intensas, los cambios de temperatura y los ciclos de humedad y sequedad, afectan la estabilidad del suelo. La lluvia es el factor más importante porque aumenta la infiltración, satura el suelo, eleva la presión de los poros y reduce la resistencia al corte. Esto puede causar erosión y movimientos en masa, sobre todo en laderas sin vegetación (Suárez Díaz, 1998).

Remoción de capas superficiales

La pérdida de la cobertura vegetal o de las capas superficiales cohesivas, causada por la deforestación o la erosión del agua y el viento, deja expuestos materiales más frágiles y disminuye la protección frente a la infiltración y el desgaste (De Matteis, 2003).

Incremento de cargas hidrostáticas

El aumento de la presión del agua en los poros del suelo o en las discontinuidades ocurre cuando sube el nivel freático o se infiltra agua de lluvia. Esta presión reduce los esfuerzos efectivos ($\sigma' = \sigma - u$), lo que disminuye mucho la resistencia friccionante del suelo y puede causar fallas repentinas, sobre todo en materiales granulares sueltos o suelos finos saturados (Braja M., Principles of Foundation Engineering, 2011).

3.2.7. Tipos de fallas más comunes en taludes

Figura 10.

Tipos de fallas más comunes en taludes



Nota. Adaptado de *Estabilidad de taludes* (p. 5 - 8) por Álvaro De Matteis, 2003.

Deslizamientos superficiales.

Cualquier talud está sujeto a fuerzas naturales que tienden a hacer que las partículas y porciones del suelo próximas a su frontera deslicen hacia abajo. Se refiere esta falla al proceso más o menos continuo, y por lo general lento, de deslizamientos ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas laterales.

Existen dos clases de deslizamientos: el *estacional* que afecta solo a la corteza superficial de la ladera que sufre la influencia de los cambios climáticos en forma de expansiones y contracciones térmicas o por humedecimiento y secado, y el *masivo*, a capas de tierra más profundas, no interesadas por los efectos ambientales y que, en consecuencia, solo se puede atribuir al efecto gravitacional. El primero en mayor o menor grado siempre existe, variando su intensidad según la época del año; en cambio el segundo los movimientos son prácticamente constantes, el fenómeno se pone de manifiesto a los ojos del ingeniero cuando nota que los árboles y postes están inclinadas respecto de la vertical, cuando se evidencian agrietamientos o escalonamientos en el talud (De Matteis, 2003, pág. 6).

Movimientos del cuerpo del talud.

En taludes movimientos bruscos que afectan a masas considerables de suelo, con superficies de falla que penetran profundamente en su cuerpo, interesando o no al terreno de fundación. Se considera que la superficie de falla se forma cuando en la zona de su futuro desarrollo actúan esfuerzos cortantes que sobrepasan la resistencia al corte del material; a consecuencia de ello sobreviene la ruptura del mismo, con la formación de una superficie de deslizamiento a lo largo de la cual se produce la falla. Estos fenómenos se los denomina “deslizamientos de tierras” y puede estudiarse dos tipos bien diferentes (De Matteis, 2003, pág. 6).

Falla rotacional.

En el primer lugar se define una superficie de falla curva, a lo largo de la cual ocurre el movimiento del talud. Esta superficie forma una traza con el plano del papel que puede asimilarse, por facilidad y sin mayor error a una circunferencia, aunque pueden existir formas algo diferentes, en la que por lo general influye la secuencia geológica local, el perfil estratigráfico y la naturaleza de los materiales. Estas fallas son llamadas de rotación. Este tipo de fallas ocurren por lo común en materiales arcillosos homogéneos o en suelos cuyo

comportamiento mecánico este regido básicamente por su fracción arcillosa. En general afectan a zonas relativamente profundas del talud, siendo esta profundidad mayor cuanto mayor sea la pendiente (De Matteis, 2003, pág. 7).

Falla traslacional.

La falla traslacional es un tipo de movimiento en masa en el que el deslizamiento ocurre sobre una superficie de falla que suele ser plana o levemente ondulada, y normalmente sigue la estratificación del terreno o planos de debilidad ya existentes. Este fenómeno es común en suelos granulares estratificados, rocas sedimentarias o macizos con discontinuidades marcadas, donde el bloque superior se mueve casi en paralelo a la pendiente y sin rotar de forma notable (De Matteis, 2003).

Tipo falla en la zona de estudio

El estudio de mecánica de suelos identificó el suelo del sector como granular limoso. Esto indica que la falla más probable en el talud será traslacional, ya que este tipo de material tiene propiedades geotécnicas específicas. Los suelos granulares limosos, clasificados como SM según el SUCS, tienen cohesión muy baja o casi nula, por lo que su resistencia al corte depende casi solo del ángulo de fricción interna. Por esta razón, no es común que se formen superficies de falla curvas o profundas, que son típicas de las fallas rotacionales. Estas últimas suelen presentarse en suelos arcillosos homogéneos, donde la cohesión y el comportamiento plástico influyen mucho en la estabilidad.

A diferencia de otros tipos, los suelos granulares tienen una ligera estratificación o cambios en el tamaño de los granos que crean planos naturales de debilidad. Esto facilita deslizamientos planos o traslacionales, sobre todo si la pendiente es fuerte o si hay saturación parcial que reduce la resistencia. Además, el agua se infiltra más rápido en estos suelos, lo que aumenta la presión de poros y disminuye la capacidad del terreno para resistir esfuerzos, favoreciendo desplazamientos superficiales o de bloques a lo largo de planos casi rectos.

En taludes viales como el analizado, que están expuestos a cambios climáticos estacionales y a erosión constante, estas condiciones aumentan la probabilidad de fallas traslacionales. Por eso, el comportamiento del suelo granular limoso, junto con las características geométricas y ambientales del talud, hace que la falla traslacional sea el mecanismo de inestabilidad más probable. Esto debe ser una prioridad en el análisis y en el diseño de las soluciones de estabilización.

3.2.8. Métodos para estabilización de taludes

Método de fellenius

Es un método de equilibrio límite que supone una superficie de falla circular y divide la masa deslizante en dovelas verticales. Solo toma en cuenta el equilibrio de momentos y descarta las fuerzas horizontales y verticales entre dovelas. Por su formulación simplificada, se usa sobre todo en análisis preliminares de estabilidad en taludes homogéneos y presas de tierra, aunque suele dar resultados conservadores (Fellenius, 1936).

Método de bishop

Es un método de equilibrio límite que analiza superficies de falla circulares y toma en cuenta el equilibrio de momentos y fuerzas verticales. A diferencia del método de Fellenius, este método estima también las fuerzas horizontales entre dovelas, lo que permite calcular el factor de seguridad con mayor precisión. Se usa mucho en geotecnia para evaluar la estabilidad de taludes en suelos homogéneos y estratificados (Bishop, 1955).

Método de janbu

Es un método de equilibrio límite generalizado que permite analizar superficies de falla no circulares, como las traslacionales o compuestas. Toma en cuenta el equilibrio de fuerzas y momentos y acepta diferentes formas de superficies de deslizamiento, por lo que resulta especialmente útil para taludes estratificados o con geometrías complejas. Se usa

mucho en suelos granulares y en diseños que incluyen elementos de refuerzo como geosintéticos (Janbu, 1973).

Método morgenstern y price

Es un método de equilibrio límite general que cumple con el equilibrio de fuerzas y momentos. Permite analizar superficies de falla de cualquier forma usando una función que define la inclinación de las fuerzas entre dovelas. Gracias a su rigor matemático, se puede aplicar a taludes complejos, estratificados o con agua, y ofrece soluciones precisas para el factor de seguridad (Morgenstern & Price, 1965).

Método de bell

Es un método general de equilibrio límite que cumple con todas las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos, y permite analizar superficies de falla de cualquier forma. Tiene en cuenta la inclinación variable de las fuerzas entre dovelas y se puede aplicar a taludes complejos, estratificados o con diferentes presiones de poro. Su formulación precisa lo hace útil para diseñar estabilizaciones con estructuras de contención o refuerzos geosintéticos (Bell, 1968).

3.2.9. Método empleado para la estabilización en chuquicahuana

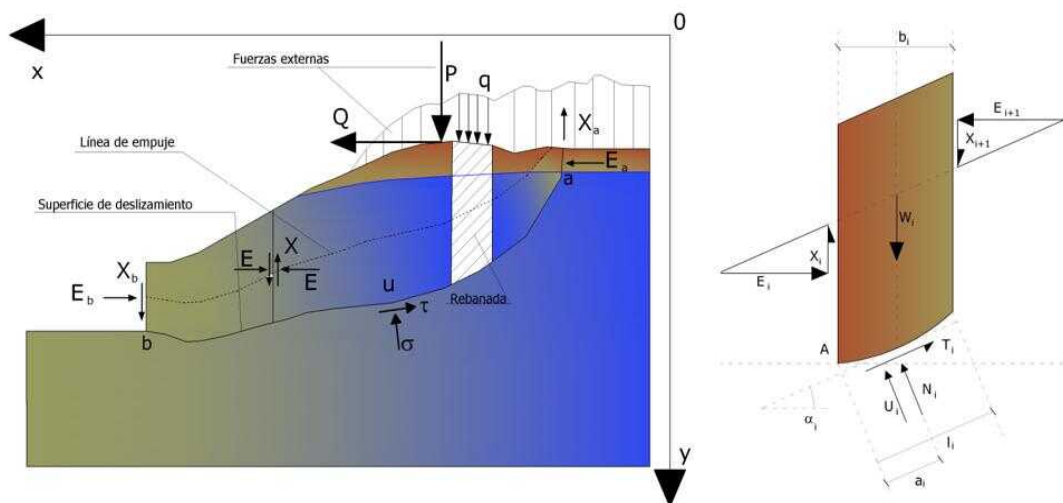
En esta investigación se usa el método de Janbu porque se ajusta bien al análisis de taludes con superficies de falla no circulares y profundas, como el que se estudia aquí. A diferencia de los métodos circulares tradicionales, Janbu permite modelar de manera más realista los mecanismos de falla traslacionales o planares, que suelen ocurrir en suelos granulares con poca cohesión y pendientes pronunciadas. Además, es compatible con geometrías complejas, refuerzos geosintéticos como geomallas y geoceldas, banquetas y cargas externas, lo que resulta clave para evaluar soluciones de estabilización actuales.

El método de Janbu es muy usado en la práctica geotécnica y en programas como GeoStru Slope. Permite comprobar si se cumple el Factor de Seguridad que pide la norma

CE.020, tanto en condiciones estáticas como pseudoestáticas. Su enfoque en el equilibrio global de fuerzas y el uso de factores de corrección dan resultados conservadores y consistentes en estudios de estabilidad. Por eso, es una herramienta confiable para justificar la alternativa de estabilización elegida en esta investigación.

Figura 11.

Representación gráfica del método de Janbu



Nota. Tomado de *Slope Stability Computations* (p. 50) por Janbu, 1973.

Formulación básica del factor de seguridad janbo (f.s.)

Para una superficie de falla dividida en nn dovelas verticales, el **Factor de Seguridad global** se define como:

$$F = \frac{f_0 \cdot \sum \{c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times F}{\sum W_i \times \tan \alpha_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot (1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i)}$$

Donde:

c = cohesión en la base de la dovela (kg/cm^2)

ϕ = ángulo de fricción interna en la base de la dovela ($^\circ$)

W = peso total de la dovela (kg)

u = presión de poros en la base de la dovela (kg/cm²)

b = ancho de la dovela (m)

α = inclinación de la base de la dovela respecto a la horizontal (°)

Factor de seguridad

Este parámetro es fundamental en la ingeniería geotécnica porque muestra cómo se relaciona la resistencia del suelo con el esfuerzo necesario para equilibrar las cargas. Se define como la relación entre la resistencia máxima al corte del suelo y el esfuerzo cortante que se moviliza en una masa de suelo o en una estructura geotécnica. Para garantizar la estabilidad, su valor debe ser mayor que 1.0. Este valor cambia según el tipo de análisis, como la capacidad de carga, la estabilidad de taludes o la presión lateral, y también depende de la incertidumbre en las propiedades del suelo. En el diseño, se suelen usar valores entre 1.5 y 3.0, según la normativa y la importancia de la estructura (Braja M., *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, 2013).

El Factor de Seguridad (FS) es un cociente que evalúa la estabilidad estructural, calculado como la razón entre las fuerzas o momentos resistentes y los desestabilizantes, como se muestra en la siguiente fórmula.

$$FS = \frac{\sum \text{Fuerzas o momentos resistentes}}{\sum \text{Fuerzas o momentos desestabilizantes}}$$

Fuerzas o momentos resistentes

En mecánica de suelos, la fuerza resistente es la capacidad máxima del suelo para soportar esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie potencial de falla antes de que ocurra el deslizamiento. Esta resistencia se deriva de dos componentes: la cohesión entre las partículas y la fricción interna que depende del esfuerzo normal efectivo actuando sobre el

plano de falla. El principio fundamental se expresa mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb, que establece que la resistencia al corte (τ_f) en un punto es $\tau_f = c + \sigma \tan \phi$, donde c es la cohesión, σ es el esfuerzo normal y ϕ es el ángulo de fricción del suelo (Braja M., Geotechnical Engineering Handbook, 2011).

Fuerzas o momentos desestabilizantes

En el análisis de estabilidad de taludes, las fuerzas o momentos desestabilizantes son aquellas acciones o esfuerzos que pueden causar el movimiento o la falla de una masa de suelo o roca a lo largo de una posible superficie de deslizamiento. Estas fuerzas impulsan la inestabilidad y se oponen a las fuerzas o momentos que resisten el movimiento. En un talud, la fuerza desestabilizante principal suele ser el peso del material que está por encima de la superficie de falla. También influyen otras acciones, como las sobrecargas externas (por ejemplo, estructuras o tráfico), las presiones de agua intersticial (que disminuyen las tensiones efectivas y pueden generar empujes de agua) y, en algunos casos, las fuerzas sísmicas. El momento desestabilizante normalmente se calcula respecto a un centro de rotación, como ocurre en fallas circulares, y se obtiene multiplicando estas fuerzas por su respectivo brazo de palanca (González de Vallejo et al., 2004).

Factor de seguridad estática

En estabilidad de taludes, el Factor de Seguridad Estática (FS) es la relación entre la resistencia al corte del suelo y el esfuerzo cortante que actúa a lo largo de una posible superficie de falla en condiciones estáticas, es decir, sin cargas dinámicas como las sísmicas. Este factor es clave para saber si un talud, natural o artificial, es estable. Si el FS es mayor que 1.0, la resistencia del suelo es suficiente para evitar el deslizamiento. Si el FS es igual o menor que 1.0, hay riesgo de falla. En ingeniería geotécnica, se recomienda un FS mínimo, normalmente entre 1.25 y 1.5 para el largo plazo, para asegurar un margen de seguridad ante

posibles incertidumbres en los parámetros del suelo y las condiciones de carga (Braja M., Geotechnical Engineering Handbook, 2011).

$$FS = \frac{\sum [c'l + (N - ul) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

Aquí, c y ϕ representan los parámetros de resistencia del suelo, l es la longitud de la base de la rebanada y α es el ángulo de inclinación de la base. Como el FS aparece en ambos lados de la ecuación al calcular las fuerzas normales N , la solución se encuentra usando procesos iterativos. Los métodos más usados, como el de Bishop Simplificado, varían en las suposiciones sobre las fuerzas entre rebanadas para que el problema sea estáticamente determinado (Braja M., Geotechnical Engineering Handbook, 2011).

Factor de Seguridad Dinámica

El Factor de Seguridad Dinámica es el factor de seguridad de un talud o una estructura de retención cuando se toman en cuenta las fuerzas sísmicas. Estas fuerzas suelen analizarse con un método pseudo-estático, que simula un terremoto aplicando fuerzas horizontales y verticales constantes al posible bloque deslizante. Las fuerzas dependen de la masa del suelo y se calculan usando un coeficiente sísmico horizontal (k_h) y, en ocasiones, uno vertical (k_v). El análisis dinámico suma estas fuerzas inerciales a las ecuaciones de equilibrio límite, lo que reduce la resistencia del suelo y aumenta las fuerzas que pueden causar deslizamientos. El propósito es comprobar si el talud sigue siendo estable ($FS > 1$) durante un sismo de diseño, un criterio clave en zonas sísmicas. Este método es una forma sencilla y común de evaluar la estabilidad sísmica antes de usar análisis más avanzados que consideren la respuesta dinámica real del terreno (Braja M. & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018).

Descripción de su Calculo

- **Determinación de Coeficientes Sísmicos:** Se elige un coeficiente sísmico horizontal (k_h), que normalmente es una fracción (por ejemplo, de 0.1 a 0.3) de la aceleración máxima del terreno (PGA). El coeficiente vertical (k_v) se puede tomar como un porcentaje de k_h o como cero.
- **Aplicación de Fuerzas Sísmicas:** En cada segmento (dovela) de la masa deslizante con peso W , se aplica una fuerza horizontal pseudo-sísmica igual a $k_h W$, que actúa hacia fuera del talud. Si corresponde, también se aplica una fuerza vertical $k_v W$, que puede ir hacia arriba o hacia abajo.
- **Modificación de las Ecuaciones de Equilibrio:** Estas fuerzas se suman a las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos. Por ejemplo, en un análisis simplificado, la fuerza sísmica horizontal aumenta la fuerza desestabilizadora ($\sum W \sin \alpha$) o genera un momento volcante extra.
- **Cálculo del Factor de Seguridad:** Se resuelven las ecuaciones modificadas para obtener el Factor de Seguridad Dinámico (FSd). Este valor suele ser menor que el factor de seguridad estático. Un FSd entre 1.0 y 1.2 generalmente se considera aceptable para condiciones sísmicas de diseño.

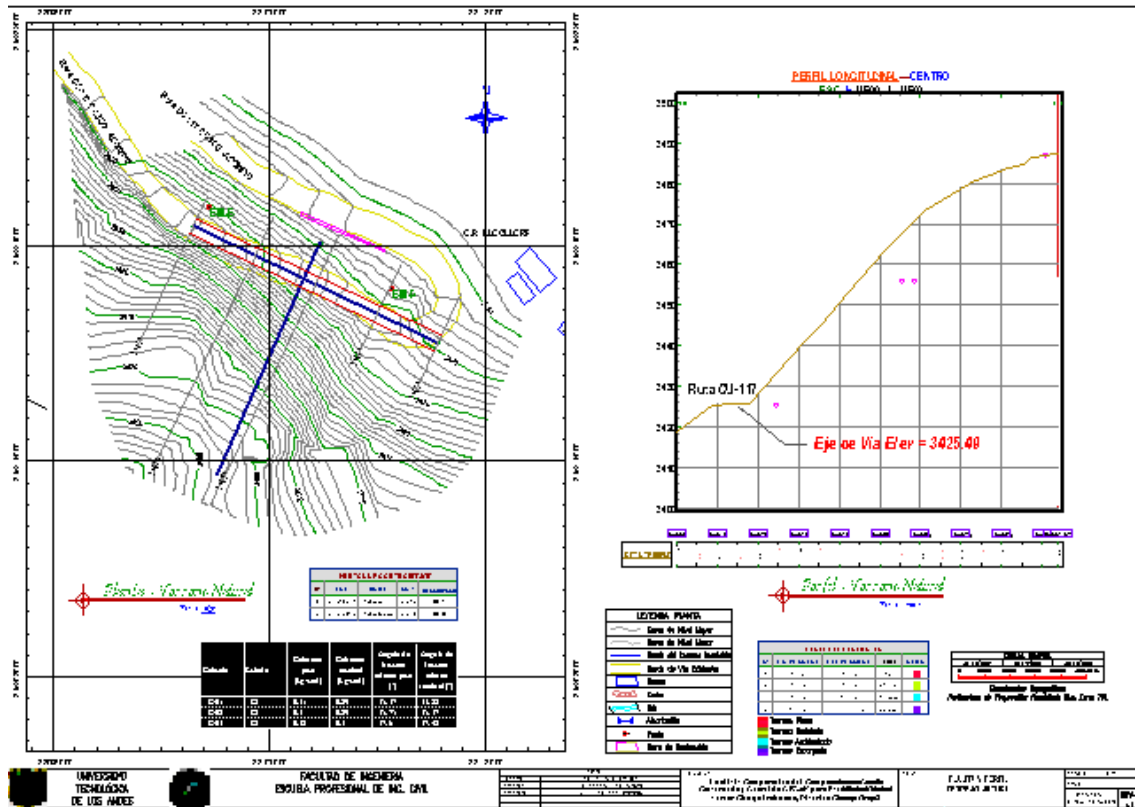
Estudio Topográfico

Un estudio topográfico es un proceso que mide y representa gráficamente un terreno, y se realiza en la etapa de proyecto de una obra civil. Se trata de levantar la superficie del terreno para crear planos detallados que muestran su relieve, como las curvas de nivel, y las estructuras naturales o artificiales presentes. Para esto, se usan sistemas de referencia, proyección y coordenadas, junto con principios geométricos y trigonométricos, además de instrumentos como estaciones totales, GPS diferencial y programas especializados. El estudio topográfico es clave para diseñar y ejecutar proyectos de ingeniería, ya que ofrece

la base geométrica precisa que se necesita para planificar y construir carreteras, edificios, obras mineras y otras infraestructuras (Villalba Sánchez, 2016).

Figura 12.

Planta y perfil del terreno natural



Nota. La Figura 12 muestra la planta y el perfil del terreno natural del área de estudio. Según la clasificación del Manual de Carreteras del MTC, el sector es un terreno accidentado porque sus pendientes principales están entre el 50% y el 100%. También se indican dos puntos de control monumentados que servirán como referencia para los replanteos durante la ejecución de las obras.

Terreno plano

Este tipo de terreno tiene pendientes transversales al eje de la vía de hasta un 10% y pendientes longitudinales que suelen ser menores al 3%. Gracias a esta topografía, se requiere poco movimiento de tierras durante la construcción, lo que hace más sencillo el

trazado de la carretera y permite usar alineamientos rectos junto con curvas de radio amplio sin complicaciones técnicas. Por eso, en estos terrenos se pueden elegir velocidades de diseño más altas y secciones transversales estándar, lo que mejora la seguridad y la eficiencia del proyecto vial ([MTC], 2018).





Terreno ondulado





Un terreno ondulado es una superficie con pendientes suaves y continuas, donde se alternan elevaciones y depresiones que forman colinas y vaguadas, sin pendientes abruptas. Este tipo de relieve necesita métodos topográficos específicos, sobre todo en altimetría, porque requiere un control preciso de la nivelación para captar bien las variaciones de altura. Al hacer perfiles longitudinales y transversales (ver capítulo 5 y figura 2.14), el terreno ondulado influye en la elección de equipos, como estaciones totales y nivelaciones geométricas, y en la corrección de errores por la curvatura de la Tierra. Es común encontrarlo en proyectos viales y de planificación, donde representar bien sus formas es clave para el diseño geométrico (Villalba Sánchez, 2016).

Terreno accidentado

Este tipo de terreno se caracteriza por pendientes transversales al eje de la vía entre el 51% y el 100%, y pendientes longitudinales predominantes entre el 6% y el 8%. Estas condiciones requieren grandes movimientos de tierra, lo que complica el trazado de la carretera. El diseño geométrico en estos casos necesita soluciones técnicas más avanzadas, como el uso frecuente de curvas horizontales cerradas, cortes y rellenos más grandes, y a veces estructuras especiales. Por eso, las velocidades de diseño suelen ser más bajas y los costos de construcción mucho mayores que en terrenos más favorables ([MTC], 2018).

Figura 13.*Relación pendiente - área de la zona de estudio*

CUADRO DE PENDIENTES				
N°	MÍN. PENDIENTE	MÁX. PENDIENTE	ÁREA	COLOR
1	1.00%	10.00%	935.40	
2	10.00%	50.00%	4593.96	
3	50.00%	100.00%	10024.66	
4	100.00%	999999.00%	4284.42	

	Terreno Plano
	Terreno Ondulado
	Terreno Accidentado
	Terreno Escarpado

Nota. La Figura 13 muestra cómo se clasifican las pendientes del área de estudio de acuerdo con la normativa peruana. La mayoría de las pendientes superan el 50%, lo que indica que el terreno es accidentado y escarpado, y por eso es necesario estabilizar el talud.

Terreno escarpado

Un terreno escarpado tiene pendientes fuertes, desniveles marcados y muchos taludes o cortes rocosos, por lo que se necesitan métodos topográficos especiales y medidas de seguridad estrictas. Para hacer el levantamiento, se usan técnicas como la triangulación de taludes y estaciones totales en modo estación libre o por resección, ya que es difícil acceder a los puntos de referencia. Es importante controlar la altimetría con precisión, corrigiendo la inclinación y usando equipos como eclímetros y distanciómetros láser. Además, en obras viales o mineras, este tipo de terreno requiere protocolos de seguridad laboral específicos, como el uso de arneses, control de desprendimientos de roca y planes de evacuación, debido al alto riesgo que presentan estas condiciones topográficas (Villalba Sánchez, 2016).

3.2.10. Estudio Geológico

El estudio geológico es el primer paso esencial en cualquier proyecto de ingeniería geológica. Su propósito es conocer el entorno físico al identificar, describir y analizar los materiales, estructuras y procesos geológicos del área y sus alrededores. Esto incluye determinar la litología (tipos de rocas y suelos), la estructura geológica (pliegues, fallas, discontinuidades), la geomorfología (formas del terreno) y las condiciones hidrogeológicas (nivel freático y flujo de agua). Al reunir estos datos, se puede crear un modelo geológico, que representa cómo se distribuyen los materiales y estructuras en el espacio. Este modelo es clave para planificar las investigaciones geotécnicas detalladas (como sondeos y ensayos) y, después, para desarrollar los modelos geomecánico y de comportamiento geotécnico necesarios para analizar y diseñar la obra (González de Vallejo et al., 2004).

Fuentes de información de la ingeniería geológica

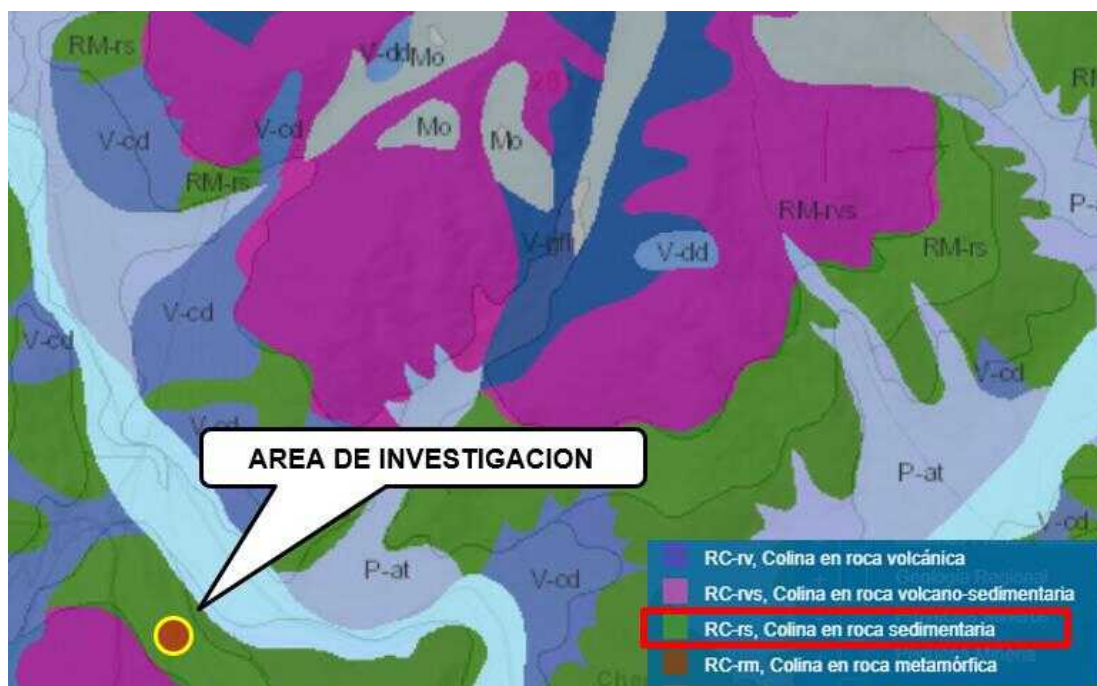
Las fuentes más importantes de información en ingeniería geológica suelen venir de asociaciones profesionales internacionales especializadas. Estas organizaciones organizan congresos, simposios y publican revistas o boletines científicos de forma regular. Entre las más reconocidas a nivel mundial están la International Association of Engineering Geology and the Environment (IAEG), la Association of Engineering Geologists (AEG), la International Society of Rock Mechanics (ISRM) y la International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMFE). Algunas de las publicaciones periódicas más relevantes son el Bulletin of the IAEG, el Bulletin of the AEG, el Quarterly Journal of Engineering Geology de la Geological Society of London, Engineering Geology (Elsevier), International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences (Elsevier) y Géotechnique (González de Vallejo et al., 2004)

En Perú, la información sobre ingeniería geológica y geotecnia proviene sobre todo de instituciones públicas, universidades y colegios profesionales. El Instituto Geológico,

Minero y Metalúrgico (INGEMMET) es la entidad principal que publica mapas geológicos, estudios de riesgos e informes técnicos. El Colegio de Ingenieros del Perú (CIP), a través de su Capítulo de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica, organiza congresos, seminarios y publica material técnico. Universidades como la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) editan revistas científicas y realizan investigaciones aplicadas. Además, se puede acceder a información digital en repositorios institucionales, bibliotecas especializadas y redes profesionales nacionales.

Figura 14.

Contexto geológico regional



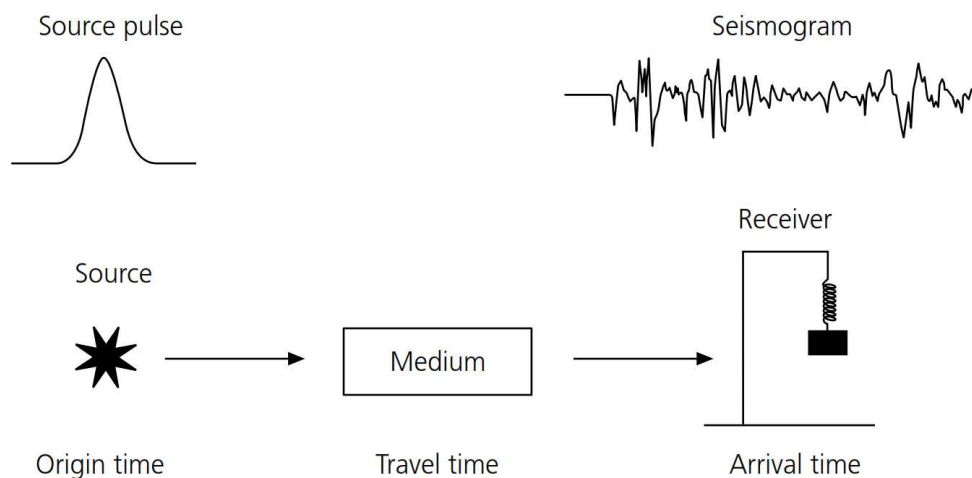
Nota. El mapa geológico regional muestra cómo se distribuyen las diferentes litologías en el área de estudio. En él se identifica la unidad de colinas en roca sedimentaria (RCrs), que es donde se encuentra el área de investigación. Esta información geológica ayuda a reconocer las principales características litológicas y sirve como base para analizar el comportamiento geomecánico del talud evaluado. Adaptado de la Carta Geológica del Perú – *INGEMMET*.

3.2.11. Estudio geofísico

Un estudio geofísico es una técnica de exploración no invasiva que permite conocer las propiedades del subsuelo midiendo y analizando fenómenos físicos, como las ondas sísmicas, sin hacer perforaciones. El método MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) es un buen ejemplo. Este método usa varios geófonos para registrar ondas Rayleigh que se generan con un impacto y luego analiza sus curvas de dispersión para obtener perfiles de velocidad de onda de corte (V_s), que muestran la rigidez del terreno a diferentes profundidades. Esta técnica aporta datos clave para diseñar cimentaciones, como los módulos de Young y de corte, y ayuda a identificar cambios de rigidez a lo largo de infraestructuras lineales, como vías férreas, detectando zonas débiles o anomalías. Al aplicarse en la electrificación de redes ferroviarias, los estudios geofísicos permiten optimizar diseños y evitar sobredimensionamientos, lo que reduce costos de manera rápida, segura y repetible. Además, integran clasificaciones normativas como el Eurocódigo 8 para evaluaciones sísmicas (Park & Sayers, 2025).

Figura 15.

Diagrama de Propagación de Ondas Sísmicas



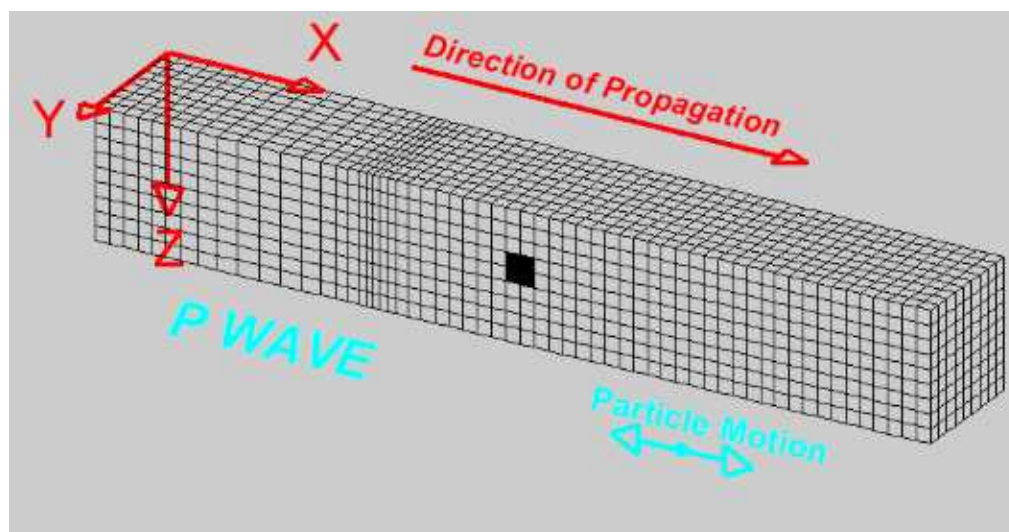
Nota. Tomado de *Slope Multi-channel analysis of surface waves (MASW) method* (p. 1) por Park & Sayers, 2025.

Ondas primarias (P)

Las ondas sísmicas primarias (P) son las ondas de cuerpo que viajan más rápido. Se generan por terremotos o explosiones y son las primeras en llegar a los sismómetros. Estas ondas son compresionales, lo que significa que las partículas se mueven en la misma dirección que la onda, permitiéndoles viajar por sólidos, líquidos y gases. En la corteza terrestre, su velocidad está entre 5 y 8 km/s. En los sismogramas, la llegada de la onda P ayuda a localizar el hipocentro del terremoto al medir su tiempo de viaje. También, estas ondas se reflejan y se desvían en las capas internas de la Tierra, como el límite entre el núcleo y el manto. Esto permite a los sismólogos conocer la estructura y composición del interior terrestre. Estudiar las ondas P es clave en la tomografía sísmica y la exploración geofísica, ya que los cambios en su velocidad muestran diferencias en las propiedades y la densidad de los materiales que atraviesan (Stein & Wysession, 2003).

Figura 16.

Propagación de Ondas P



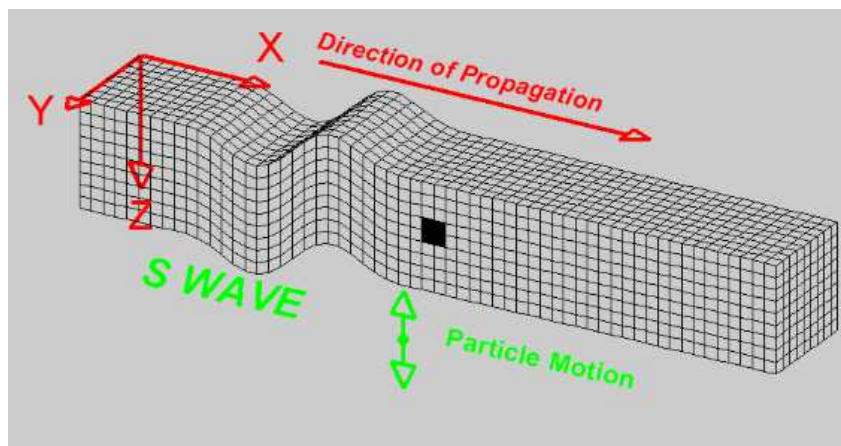
Nota. Tomado de *Lawrence Braille* (2006).

Ondas secundarias (s)

Las ondas sísmicas secundarias, llamadas ondas S, son el segundo tipo de ondas de cuerpo en velocidad y llegan a los sismómetros después de las ondas P. Su nombre viene del inglés "Secondary" (Secundaria). Estas ondas son de corte o cizalla, lo que significa que las partículas se mueven en dirección perpendicular a la propagación de la onda y causan una deformación por esfuerzo cortante en el material. A diferencia de las ondas P, las ondas S no pueden viajar por líquidos o gases, como el núcleo externo de la Tierra, porque estos no tienen rigidez ante esfuerzos de corte. Su velocidad en la corteza terrestre suele estar entre 3 y 5 km/s y depende del módulo de rigidez (μ) y la densidad (ρ) del medio, según la fórmula $v_s = \sqrt{\mu/\rho}$. En los sismogramas, las ondas S suelen tener amplitudes mayores que las ondas P, por lo que son más destructivas cerca del epicentro. Estudiar las ondas S es clave para entender la estructura interna de la Tierra, ya que su ausencia en ciertas zonas ayudó a descubrir que el núcleo externo es líquido. Además, analizar la polarización y los tiempos de llegada de las ondas S, junto con las ondas P, da información importante sobre el mecanismo de los terremotos y las propiedades elásticas del manto y la corteza (Stein & Wysession, 2003).

Figura 17.

Propagación de las ondas S



Nota. Tomado de Lawrence Braille (2006).

Método monte carlo

El Método Montecarlo es una técnica computacional que usa muestreo aleatorio para resolver problemas matemáticos o físicos complejos. Es especialmente útil en casos de alta dimensión o geometrías complicadas donde los métodos deterministas no son eficientes. Este método se apoya en la ley de los grandes números y el teorema del límite central. Al generar muchas muestras aleatorias de una distribución, el promedio de los resultados se acerca estadísticamente a la solución esperada, como el valor de una integral o la probabilidad de un evento. Aunque cada muestra es aleatoria, el error disminuye en proporción a la raíz cuadrada del número de ensayos, lo que permite controlar la precisión. El método se usa en la evaluación de integrales multidimensionales, la simulación de sistemas estocásticos (como el transporte de radiación o la dinámica molecular), las finanzas cuantitativas y los gráficos por computadora. Su fortaleza está en la flexibilidad y en técnicas como el muestreo por importancia, que ayudan a que la convergencia sea más rápida (Kalos & Whitlock, 2008).

El Método Monte Carlo es una técnica computacional de simulación estadística que permite evaluar la incertidumbre en sistemas complejos mediante la generación repetitiva de escenarios aleatorios. En ingeniería geotécnica, donde los parámetros del suelo presentan variabilidad inherente, este método resulta particularmente valioso para cuantificar la probabilidad de falla (P_0) y el índice de confiabilidad (β) de estructuras de suelo, trascendiendo el enfoque determinista tradicional basado únicamente en factores de seguridad puntuales.

En este trabajo de investigación, el Método Monte Carlo se implementó como parte del análisis probabilístico para evaluar la confiabilidad del talud natural y de las dos alternativas de estabilización con geosintéticos. Su aplicación siguió un proceso sistemático:

a) **identificación de variables aleatorias:** Se seleccionaron los parámetros geotécnicos con mayor influencia en la estabilidad y que presentaban dispersión en los ensayos de laboratorio:

- Ángulo de fricción interna (ϕ)
- Cohesión (c)
- Peso unitario (γ)

Los estadísticos descriptivos (media μ y desviación estándar σ) para estos parámetros, obtenidos de las tres calicatas.

b) **Simulación del modelo de estabilidad:** Cada conjunto de parámetros fue incorporado al modelo de equilibrio límite en **Geostru Slope**. Se ejecutó automáticamente el análisis para cada una de las 10,000 realizaciones, calculando el Factor de Seguridad (F.S.) para:

- Talud en condición natural (estático y dinámico).
- Talud reforzado con Geocelda GW20V (estático y dinámico).
- Talud reforzado con Geomalla Coextruida (estático y dinámico).

c) **Análisis estadístico de los resultados:** Los resultados obtenidos para cada escenario constituyeron una muestra estadística robusta que permitió caracterizar la distribución de probabilidad. Este proceso transformó los resultados de la simulación Monte Carlo en métricas probabilísticas de riesgo (P_f y β) fundamentales para una toma de decisiones basada en la confiabilidad, complementando y enriqueciendo el análisis determinista tradicional.

- **Probabilidad de Falla (P_0):** Proporción de simulaciones en las que el F.S. fue menor que el límite crítico (para falla real, 1.25/1.50 para evaluación normativa).

- **Índice de Confiabilidad (β):** Medida de cuántas desviaciones estándar separan al valor medio del F.S. del valor límite. Un β alto indica mayor robustez frente a la incertidumbre.

3.3. Definición de términos

a) Antrópicas

Este término abarca todas las actividades, intervenciones y cambios que las personas hacen en el entorno natural y geológico. En ingeniería geológica, es clave para comprender cómo las obras y acciones humanas interactúan con el medio geológico, ya que pueden causar, acelerar o empeorar procesos geológicos naturales y aumentar los riesgos (González de Vallejo et al., 2004).

b) Banquetas

En ingeniería geológica, especialmente al analizar y diseñar taludes, las banquetas o bermas son escalones o plataformas horizontales o casi horizontales de diferentes anchos que se construyen de forma intencionada en el talud para interrumpir su pendiente continua. El principal objetivo de esta técnica es mejorar la estabilidad general del talud (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2004).

c) Coeficiente sísmico (k_h y k_v)

Los coeficientes sísmicos k_h y k_v son valores sin unidades que se usan en el análisis pseudo-estático para simular los efectos de un terremoto. Indican qué parte de la aceleración gravitacional actúa en dirección horizontal y vertical sobre la masa del suelo o la estructura. En la práctica, se aplican como fuerzas estáticas equivalentes: $k_h W$ para la fuerza horizontal (hacia fuera del talud) y $k_v W$ para la fuerza vertical (positiva hacia abajo o negativa hacia arriba), donde W es el peso de la masa deslizante. Estos coeficientes permiten incluir las fuerzas de inercia sísmicas en los análisis de equilibrio límite y así calcular un factor de

seguridad menor bajo condiciones sísmicas de diseño (Braja M. & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018).

d) Confinamiento tridimensional

La tecnología de geoceldas utiliza una red de celdas interconectadas en tres dimensiones que limita el movimiento lateral, vertical y de cizallamiento del material de relleno, como suelo, agregado, vegetación u hormigón. Este sistema convierte materiales sueltos o poco cohesivos en una estructura estable y resistente, lo que mejora notablemente la capacidad de carga, la resistencia a la erosión y la estabilidad del terreno (Presto GeoSystems, 2020).

e) Estratificación

La estratificación del suelo es la forma en que el suelo se organiza en capas o estratos, creados por procesos geológicos de sedimentación. Estas capas se forman cuando se depositan materiales de distintos tamaños, composiciones y orígenes, por lo que cada estrato tiene propiedades físicas y mecánicas propias. En un suelo estratificado, características como la permeabilidad, la densidad, la compresibilidad y la resistencia pueden cambiar mucho de una capa a otra. Esto es clave al analizar el flujo de agua subterránea, ya que la permeabilidad puede variar entre las direcciones horizontal y vertical, lo que genera comportamientos diferentes. En la ingeniería geotécnica, la estratificación afecta directamente el diseño de cimentaciones, excavaciones y estructuras de contención, porque influye en el flujo de agua, la estabilidad del terreno y los asentamientos. Por eso, identificar bien la estratificación es esencial para un análisis geotécnico confiable (Braja M., Advanced Soil Mechanics, 2008).

f) Meteorización

Es el proceso natural mediante el cual las rocas que se encuentran en la superficie terrestre o cerca de ella se desintegran y se descomponen progresivamente como resultado

de la acción combinada de agentes físicos, químicos y biológicos, sin que exista transporte del material resultante. Este fenómeno incluye procesos como la fragmentación mecánica por cambios de temperatura, la disolución y alteración química de los minerales por acción del agua y gases atmosféricos, y la intervención de organismos vivos que contribuyen a debilitar la estructura de la roca. Según los principios de la ingeniería geotécnica, la meteorización es fundamental en la formación de suelos, ya que transforma la roca madre en materiales más sueltos, modificando sus propiedades físicas y mecánicas, lo que influye directamente en el comportamiento del terreno frente a cargas y obras de ingeniería (Braja M. & Sobhan, Principles of Geotechnical Engineering, 2018).

g) Módulo de rigidez

Es una propiedad elástica del material que muestra cómo se relacionan el esfuerzo cortante aplicado y la deformación angular resultante en un suelo o roca, siempre que la carga esté dentro del rango elástico. Indica cuán rígido es el material frente a cargas de corte y mide su resistencia a deformarse por cizalladura. En la mecánica de suelos, este parámetro es clave para predecir deformaciones bajo cargas estáticas o dinámicas, y también para analizar la interacción entre el suelo y las estructuras, así como la respuesta sísmica. Si el valor de G es alto, el material es rígido y se deforma poco ante esfuerzos cortantes. Si el valor es bajo, el material es más flexible o blando (Braja M., Advanced Soil Mechanics, 2008).

h) Polímero de alta densidad

Este sistema de geoceldas se fabrica solo con material virgen de alta calidad. El polímero logra un buen equilibrio entre resistencia y flexibilidad, lo que asegura un rendimiento constante y duradero, incluso en aplicaciones exigentes. Su uso mantiene la integridad de las celdas y ofrece un confinamiento tridimensional efectivo para estabilizar

suelos mejorando así su capacidad de soporte de carga y asegurando una larga vida útil (Presto GeoSystems, 2020).

i) Presión de poros

La presión de poro (u) es la presión del agua que ocupa los espacios vacíos entre las partículas sólidas en un suelo saturado. Este concepto es clave en el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, que dice que el comportamiento mecánico del suelo, como la resistencia al corte, la deformación y la consolidación, depende del esfuerzo efectivo (σ') y no del esfuerzo total (σ). La presión de poro se distribuye por igual en todas las direcciones y disminuye la fuerza de contacto entre las partículas, lo que afecta la estabilidad y la capacidad de deformación del suelo (Braja M., Fundamentals of Geotechnical Engineering, 2013).

j) Grado de saturación

Esta relación sin unidades muestra qué parte de los espacios vacíos de un suelo está ocupada por agua. Se calcula dividiendo el volumen de agua (V_w) entre el volumen total de vacíos (V_v) en una muestra de suelo. El valor puede ir de 0% (cuando el suelo está completamente seco) hasta 100% (cuando todos los vacíos están llenos de agua). Este parámetro es clave para describir el estado del agua en el suelo y afecta su peso, resistencia, permeabilidad y comportamiento cuando se le aplica una carga (Braja M., Fundamentals of Geotechnical Engineering, 2013).

k) Suelo granular

Este tipo de suelo está formado sobre todo por partículas gruesas, con granos de más de 0.075 mm (según el tamiz # 200 ASTM), que se pueden ver a simple vista. En esta categoría se encuentran principalmente las gravas, cuyos granos miden entre 2 mm y 8-10 cm, y las arenas, con tamaños entre 0.075 mm y 2 mm. Son materiales no cohesivos, lo que significa que su resistencia y comportamiento mecánico dependen del roce entre las

partículas y de lo compactas que estén, no de fuerzas de atracción físico-químicas. Estos suelos se originan sobre todo por procesos físicos de meteorización y transporte (González de Vallejo et al., 2004).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

Tipo de investigación: Esta investigación utilizó de tipo *descriptiva, correlacional-causal y aplicada*. Es *descriptiva* porque su objetivo es medir y caracterizar sistemáticamente las propiedades físico y mecánicas del suelo, la geometría del talud y su condición de estabilidad natural. Es *correlacional-causal* porque analiza la relación y el efecto que la variable independiente (tipo de geosintético: Geomalla Coextruida o Geocelda GW20V) ejerce sobre la variable dependiente (Factor de Seguridad). Finalmente, es *aplicada* porque su finalidad es generar un conocimiento práctico y útil para resolver el problema específico de inestabilidad del talud en el sector Chuquicahuana, proporcionando una base técnica para la toma de decisiones en el diseño y la construcción. Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, porque se procesa datos numéricos de ensayos y modelaciones para obtener resultados medibles (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

Nivel de investigación: La investigación es de nivel *explicativo* porque analiza y explica la relación de causa y efecto entre el uso de geosintéticos, Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, y el aumento del factor de seguridad del talud. Además, evalúa su desempeño técnico y económico según los criterios y exigencias de la norma CE.020, Estabilización de Suelos y Taludes (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

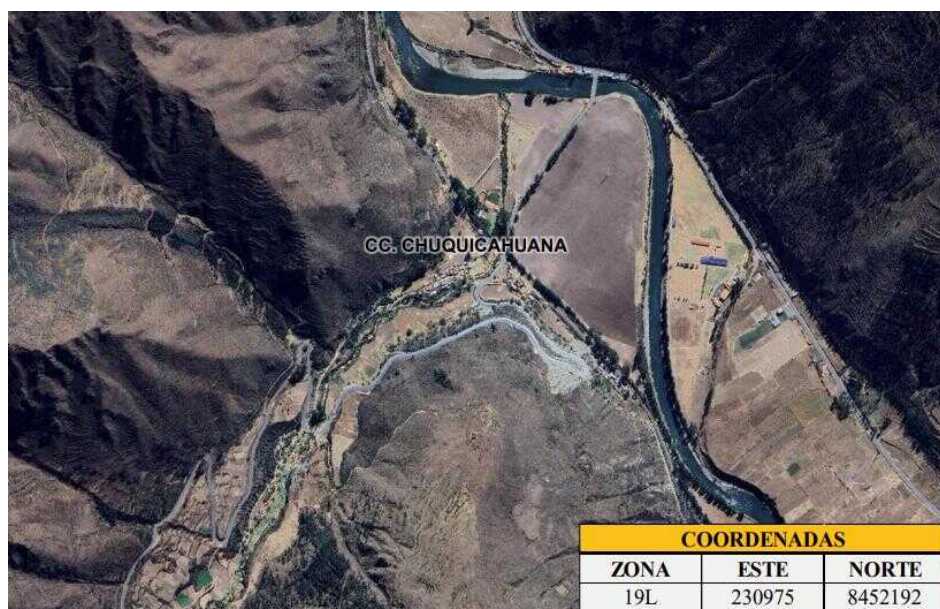
En consecuencia, el *Diseño de la Investigación* corresponde a un *diseño no experimental, transversal*. Es no experimental porque la relación entre variables se analiza mediante modelación numérica controlada; transversal porque los datos se recolectaron en un único momento.

4.2. **Ámbito temporal y espacial**

La presente tesis se llevó a cabo en el Sector de Chuquicahuana, Distrito Checacupe, llevado a cabo en el año 2025.

Figura 18.

Ámbito temporal y espacial – Chuquicahuana



Nota. Fuente: Google Earth

4.3. **Población y muestra**

Población: Está constituida por todo el tramo desde el sector Chuquicahuana progresiva km 163+000 hasta el centro poblado de Yanampampa km 155+000 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117, distrito de Sangarara, provincia de Acomayo, departamento de Cusco.

Después de definir la unidad de muestreo o análisis, se delimitó la población que se estudió y a la que se busca generalizar los resultados. La población es el conjunto de todos los casos (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

Muestra: De acuerdo con la información obtenida, la muestra para el trabajo de investigación se delimitó entre las progresivas km 161+956 hasta km 162+056 de la carretera Red Departamental - ruta CU – 117 en el sector de Chuquicahuana, en el Distrito de Checacupe, Provincia Canchis y Departamento Cusco.

En el proceso cuantitativo, la muestra es un subgrupo de la población de interés del que se recolectan datos. Es importante definirla y delimitarla con precisión antes de iniciar, y debe ser representativa de la población (Hernández Sampieri, Fernández Collado, & Baptista Lucio, 2014).

Se eligió analizar un solo talud como muestra siguiendo criterios técnicos y metodológicos que aseguran la validez del estudio. El talud seleccionado es el sector más crítico del tramo evaluado, ya que los resultados del estudio de mecánica de suelos de las tres calicatas, la geometría del corte y la evidencia de inestabilidad superficial muestran un mayor riesgo potencial.

Este talud refleja bien el comportamiento geotécnico del corredor vial porque tiene las mismas características litológicas y climáticas que afectan la estabilidad general. Como el estudio es aplicado, el objetivo es proponer una solución de estabilización viable. Por eso, se concentran los recursos analíticos en el punto donde el problema es más grave y donde la intervención puede tener mayor efecto. Elegir un tramo de 100 metros no limita la investigación, sino que ayuda a obtener resultados más conservadores en las zonas críticas, que son comparables y se pueden aplicar directamente al diseño de las alternativas propuestas.

4.4. Instrumentos

Durante los cálculos se obtuvieron datos cuantificables que sirvieron como base para el análisis. Se usaron programas especializados: Excel 2020 para hojas de cálculo, Delphin Express 2024.2 para presupuestos de obra, AutoCAD 2024 y Civil 3D 2024 para el diseño y modelado geométrico, y Geostru Slope 2018 para analizar la estabilidad de taludes.

Se interpretaron los datos y se verificó la precisión de las propiedades y características identificadas en los resultados usando un enfoque cuantitativo, lo que permitió validar técnicamente todos los parámetros evaluados.

4.4.1. *Software de cálculo utilizados*

Excel 2016: Esto permitió organizar y ordenar los datos, usar fórmulas matemáticas, crear tablas dinámicas y hacer gráficos que ayudaron a comparar los resultados.

Delphin Express 2024.2: Se eligió este software porque es un estándar en el sector construcción en el Perú y permite calcular metrados, partidas y costos directos e indirectos según las normativas locales.

AutoCAD 2019 y Civil 3D 2019: Herramientas clave para representar formas geométricas, diseñar planos y crear modelos en 3D, que se usan en ingeniería civil para la topografía, el trazado de vías y el análisis de volúmenes.

Geostru Slope: Este software especializado en geotecnia permitió analizar la estabilidad de taludes usando el método de equilibrio límite. Ofreció factores de seguridad (FS) y condiciones críticas de falla, que son parámetros clave en la ingeniería geotécnica.

Google Earth: Es un programa digital que usa imágenes satelitales y fotos aéreas para crear modelos tridimensionales detallados de la superficie de la Tierra. Así, permite ver, medir y analizar cualquier lugar del planeta.

SeisImager: Este software está diseñado para procesar, analizar e invertir datos geofísicos obtenidos con métodos sísmicos como MASW (Multichannel Analysis of Surface

Waves) y Refracción Sísmica. Permite determinar perfiles de velocidad de onda de corte (V_s) del subsuelo a grandes profundidades.

4.4.2. *Equipo de laboratorio*

Juego de Tamices: Las mallas normalizadas según ASTM se usan en el ensayo de granulometría para conocer cómo se distribuyen los tamaños de las partículas de un suelo, ya sea por tamizado en seco o en húmedo.

Copa Casagrande: Este equipo de laboratorio se usa para determinar el Límite Líquido (LL) de un suelo. Mide cuántos golpes se necesitan para cerrar una ranura estándar en una muestra que cae de forma controlada.

Equipo de Densidad de Campo: Este conjunto de herramientas, que incluye un cono de arena, un densímetro y un balón de hule, se utiliza para medir la densidad del suelo en el lugar y calcular su grado de compactación en comparación con el método Proctor.

Balanza: Este instrumento de precisión mide la masa de muestras de suelo, agregados o materiales geotécnicos en ensayos de laboratorio como granulometría, contenido de humedad y densidad.

Horno Termostático (110° C +/- 5): Este equipo seca muestras de suelo a una temperatura constante de 105 a 110°C para medir su contenido de humedad, peso unitario seco y otros índices físicos.

Geófonos: Sensores sísmicos detectan ondas de compresión (P) y de corte (S) que se producen en el terreno. Se usan en prospección geofísica, como MASW y refracción, para evaluar las propiedades dinámicas del subsuelo.

4.4.3. *Ensayos*

Granulometría: Es el proceso que se usa para determinar cómo se distribuyen los tamaños de las partículas en una muestra de suelo. Este análisis muestra el porcentaje, por

peso, de partículas de distintos diámetros, desde gravas y arenas hasta limos y arcillas. Los resultados se representan en una curva de distribución de tamaño de partícula, que se dibuja en un gráfico semilogarítmico: el porcentaje que pasa se coloca en la escala aritmética y el diámetro de partícula en la escala logarítmica (Braja M., *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, 2013).

Límites de consistencia: Los Límites de Consistencia, o Límites de Atterberg, son porcentajes de humedad que marcan los cambios entre los distintos estados de un suelo fino, como arcilla o limo, según su humedad. El científico sueco Albert Mauritz Atterberg los definió para ayudar a describir la plasticidad y consistencia del suelo. Hay tres límites principales. El Límite Líquido (LL) es el porcentaje de humedad en el que el suelo pasa de líquido a plástico. Se mide en laboratorio con el aparato de copa de Casagrande, contando los golpes necesarios para cerrar una ranura estándar en una pasta de suelo. El Límite Plástico (PL) es el contenido de humedad en el que el suelo deja de ser plástico y se vuelve semisólido. Se determina al enrollar el suelo en hilos de 3.2 mm de diámetro hasta que se agrieten. El Límite de Contracción (SL) es el porcentaje de humedad por debajo del cual el suelo ya no reduce su volumen al secarse. La diferencia entre el límite líquido y el plástico se llama Índice de Plasticidad ($PI = LL - PL$), un dato clave para clasificar suelos finos. Estos límites se muestran en la Carta de Plasticidad (figura 3.19, p. 74), que usa el LL y el PI para distinguir entre arcillas, limos y suelos orgánicos. Esta carta es una herramienta importante en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. En la ingeniería, los límites de consistencia ayudan a prever cómo se comportará el suelo ante cambios de humedad, su compresibilidad, expansividad y si es adecuado para cimentaciones (Braja M., *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, 2013).

Contenido de Humedad: El contenido de humedad (W) es un parámetro clave para describir el estado de un suelo. Se define como la relación entre el peso del agua en los poros

de una muestra y el peso de sus partículas sólidas secas, expresado en porcentaje. Para medirlo, se seca una muestra de suelo en una estufa a temperatura controlada (normalmente entre 105 y 110°C) hasta que su peso no cambia. El cálculo es $W=(Ph-Ps)/Ps \times 100$, donde Ph es el peso húmedo inicial y Ps el peso seco final. Este valor es importante para conocer la consistencia y el comportamiento del suelo, sobre todo en materiales finos. Los valores típicos varían mucho: en suelos granulares como arenas y gravas suele estar entre 5 y 8%, en suelos arcillosos puede llegar a 60-70%, y en suelos orgánicos o de marisma puede alcanzar 300-400%. En ingeniería, se compara el contenido de humedad natural con los límites de Atterberg (límite líquido LL y límite plástico LP) para clasificar la consistencia del suelo usando el índice de fluidez $IL=(W-WP)/(WL-WP)$. Este índice muestra si el suelo se comporta como sólido, plástico o líquido. La humedad también afecta directamente propiedades como la densidad aparente, la resistencia al corte y la compresibilidad, por lo que es fundamental en estudios de compactación, consolidación y estabilidad de taludes (González de Vallejo et al., 2004).

Densidad de Campo: La densidad de campo es el peso unitario seco del suelo compactado en el lugar, medido directamente en la obra después de colocar el material en capas y compactarlo con el equipo adecuado, como rodillos. Esta medición es clave para el control de calidad, ya que permite comprobar si se cumplen los parámetros de densidad del proyecto. El manual indica que la densidad de campo suele determinarse con el ensayo de reemplazo de arena (cono de arena), según la norma ASTM D1556, o con densómetros nucleares (ASTM D2922), que ofrecen resultados rápidos de densidad y humedad (Braja M., Geotechnical Engineering Handbook, 2011).

Corte Directo: El ensayo de corte directo es un método de laboratorio clave para medir la resistencia al corte de suelos, especialmente en suelos granulares bajo condiciones drenadas. El equipo tiene una caja dividida en dos mitades donde se coloca la muestra de

suelo. Se aplica una fuerza normal constante (N) y luego una fuerza cortante horizontal (T) a una velocidad controlada hasta que la muestra falla. Durante el proceso, se mide la deformación horizontal y la resistencia cortante máxima (τ_f). Los resultados, que suelen graficarse como esfuerzo cortante frente a deformación horizontal, permiten calcular la cohesión (c) y el ángulo de fricción interna (ϕ). En arenas, la curva esfuerzo-deformación muestra un pico de resistencia en suelos densos y luego un valor residual, mientras que en otros suelos la resistencia se estabiliza poco a poco. Aunque es un método sencillo, el ensayo simula bien las condiciones de deformación plana y se usa mucho para definir la envolvente de falla de Mohr-Coulomb en proyectos geotécnicos (Braja M., *Advanced Soil Mechanics*, 2008).

La elección del Ensayo de Corte Directo sobre el Ensayo Triaxial se fundamenta en las características específicas del suelo en estudio y el mecanismo de falla crítico del talud analizado:

- **Tipo de Suelo:** El estudio de talud se caracterizó como granular granular limoso (GM/GW-GM según SUCS), con un comportamiento predominantemente friccionante y cohesión baja (ver Tablas 10 y 11). Para suelos granulares, donde la resistencia al corte es función primordial del ángulo de fricción interna (ϕ) y la densificación, el ensayo de corte directo es ampliamente reconocido como un método confiable, directo y reproducible para la determinación de estos parámetros bajo condiciones drenadas.
- **Mecanismo de Falla Esperado:** El análisis de estabilidad identificó que la superficie de falla crítica más probable es de tipo traslacional o planar (ver Ítem 3.2.7.5 y Figuras 23, 24). El ensayo de corte directo simula de manera más directa este mecanismo, ya que induce una falla a lo largo de un plano predeterminado y único, similar a lo que ocurriría en un deslizamiento planar. En contraste, el ensayo

triaxial, al producir una condición de tensión axisimétrica, es más adecuado para analizar mecanismos de falla rotacional o para estudiar la respuesta tensión-deformación bajo diferentes trayectorias de esfuerzos, no siendo estrictamente necesario para el tipo de análisis de equilibrio límite aplicado.

4.5. Procedimientos

Recolección de información secundaria y reconocimiento de campo

En la primera etapa se reunió información geológica y geomorfológica del sector Chuquichuana, en el distrito de Checacupe. Al mismo tiempo, se hizo un reconocimiento topográfico detallado del talud entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 de la carretera CU-117, usando una estación total Leica TS 06 PLUS. Este trabajo permitió obtener la geometría exacta del talud, como la ubicación del pie, el hombro, las obras de arte existentes, las viviendas y los bordes de la vía. Estos datos son clave para el modelado posterior.

Investigación geotécnica de campo

En el área crítica del talud se ejecutaron tres calicatas (C-01, C-02, C-03) hasta profundidades entre 1.50 y 2.80 metros. En cada una se realizó una descripción estratigráfica visual detallada y se tomaron muestras alteradas representativas de cada una de las calicatas. Complementariamente, se efectuaron ensayos in situ de densidad natural mediante el método del cono de arena, con el objetivo de determinar el peso unitario húmedo del suelo en su estado natural.

La altura de excavación se basó en los siguientes criterios técnicos y normativos

- *Alcance de la zona de influencia del talud:* Se consideró una profundidad mayor a la de la superficie de falla crítica encontrada en los análisis preliminares. En taludes de suelos granulares, esta superficie suele ubicarse en los primeros metros.

- *Caracterización estratigráfica completa:* Facilita la identificación y descripción de todos los estratos importantes en el suelo que pueden influir en la estabilidad.
- *Obtención de muestras representativas:* Asegúrese de que las muestras alteradas recuperadas incluyan los materiales principales presentes en el volumen de suelo que podría moverse en una falla.
- *Tenga en cuenta las limitaciones prácticas y de seguridad,* como la estabilidad de las paredes de la excavación, el nivel freático estimado y la accesibilidad del equipo de perforación en terrenos difíciles.
- *Criterios normativos:* Se debe seguir lo que indican normas como la CE.020 y la ASTM D420, que recomiendan profundidades mínimas de exploración según la altura del talud y el tipo de estudio.

Ensayo de laboratorio para la caracterización del suelo

Los especímenes tomados fueron ensayados en laboratorio conforme a normas ASTM (American Society for Testing and Materials), para determinar sus propiedades físicas y mecánicas. Para las propiedades físicas se determinó la granulometría (ASTM D422), los límites de Atterberg (ASTM D4318), el contenido de humedad (ASTM D4643) y el peso específico de los sólidos (ASTM D854), clasificándose finalmente el suelo según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para las propiedades mecánicas, se realizaron ensayos de corte directo (ASTM D3080) en muestras representativas, obteniéndose los parámetros críticos de resistencia al corte: cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ), tanto en estado pico como residual.

Estudio geofísico para parámetros dinámicos

Se realizó una prospección sísmica mediante el método MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales) a lo largo de una línea de 96 metros en el sector. El procesamiento de los datos registrados se realizó con el software SeisImager, lo que permitió obtener el

perfil de velocidades de onda de corte (V_s). A partir de este perfil se determinó la clasificación del suelo de acuerdo con la Norma E.030 y se calcularon los coeficientes sísmicos horizontales (k_h) y verticales (k_v) necesarios para el análisis dinámico de estabilidad.

Modelación y análisis de estabilidad del talud

Con los parámetros geotécnicos obtenidos (peso unitario γ , cohesión c , ángulo de fricción ϕ) y la geometría precisa del talud, se construyó un modelo numérico en el software GEOSTRU SLOPE 2018. Se aplicó el método de equilibrio límite de Janbu, seleccionado por su idoneidad para analizar superficies de falla no circulares, como el mecanismo traslacional característico de suelos granulares. Se analizaron tres escenarios definidos: a) el talud en su condición natural, para cuantificar su Factor de Seguridad (F.S.) basal y validar la condición de inestabilidad; b) el talud estabilizado con Geocelda GW20V, modelando el efecto de confinamiento tridimensional que mejora la resistencia al corte aparente del suelo; y c) el talud estabilizado con Geomalla Coextruida, modelando el refuerzo planar como un elemento que aporta resistencia a la tracción. Para cada escenario se evaluó el F.S. en condiciones estáticas y dinámicas (incorporando los coeficientes sísmicos), contrastando los resultados con los criterios mínimos establecidos en la Norma CE.020 (F.S. ≥ 1.50 para estado estático; F.S. ≥ 1.25 para estado dinámico).

Análisis económico comparativo

La base de datos de costos unitarios, metrados y partidas presupuestales que usa el software Delphin Express 2024.2 se creó a partir del Expediente Técnico del proyecto *“Renovación de puente; en el (la) camino vecinal cu 1426 (puente huallo), trayectoria: huallatuyo – sayripampa en la comunidad campesina de quisini, distrito de marangani, provincia de canchis, departamento cusco”*, publicado en el portal oficial del SEACE. Esta elección tiene una justificación metodológica porque:

- *Similitud geográfica y de contexto*: Ambos proyectos están ubicados en la provincia de Canchis y comparten condiciones de mercado, disponibilidad de materiales, costos de mano de obra y tarifas de equipos.
- *Naturaleza técnica comparable*: El proyecto mencionado tiene trabajos de estabilización y obras de arte con geosintéticos. Esto hace posible extrapolar de manera válida los precios unitarios, los rendimientos y las estructuras de costos.
- *Fuente oficial y transparente*: El *SEACE* ofrece información validada de licitaciones públicas, lo que asegura que los datos reflejan precios de mercado y prácticas constructivas actuales en la región.

De este modo, se asegura que el análisis económico comparativo entre la Geomalla Coextruida y la Geocelda GW20V se basa en una referencia técnico-económica real, confiable y contextualmente pertinente.

4.6. Análisis de datos

El análisis de datos se organizó en cuatro niveles: descriptivo, inferencial, probabilístico y de modelación determinista. Esto permitió caracterizar los datos, validar hipótesis, medir la incertidumbre y respaldar la elección de la mejor alternativa de estabilización.

4.6.1. Análisis descriptivo estadístico

Se utilizó para resumir y mostrar las propiedades físicas y mecánicas del suelo obtenidas en las tres calicatas. Se calcularon medidas de tendencia central y dispersión para los principales parámetros geotécnicos.

4.6.2. Análisis inferencial y estadístico

Se realizaron análisis de sensibilidad y pruebas de comparación para evaluar la confiabilidad de los resultados del modelo y la significancia estadística de las diferencias entre las alternativas de estabilización.

4.6.3. *Análisis de sensibilidad (prueba de escenarios)*

Se modificaron de forma sistemática los parámetros de entrada más importantes dentro de un rango probable de $\pm 10\%$, y se observó cómo esto afectó el Factor de Seguridad (F.S.).

4.6.4. *Comparación estadística de las alternativas*

Se utilizó una prueba de comparación de medias, conocida como análisis de varianza conceptual, para analizar los resultados clave, específicamente el aumento del F.S. en comparación con el estado natural.

4.6.5. *Análisis probabilístico (evaluación de la confiabilidad)*

Se utilizó una prueba de comparación de medias, conocida como análisis de varianza conceptual, para analizar los resultados clave, específicamente el aumento del F.S. en comparación con el estado natural.

Probabilidad de falla (p_0)

Se usó el valor del F.S. dinámico del talud natural (0.90) y, al asumir una distribución normal para la resistencia, se estimó una P_0 inicial muy alta. Esto confirma que es necesario intervenir de manera urgente.

Nivel de confiabilidad de las soluciones

En las alternativas reforzadas, los F.S. obtenidos (1.78 / 1.72 en estático; 1.32 / 1.27 en dinámico) superan ampliamente el límite de falla (F.S.=1.50 y F.S.=1.25). Esto indica que la probabilidad teórica de falla es muy baja y que ambas soluciones son altamente confiables. La Geocelda, al mostrar valores un poco más altos, brinda un margen extra de confiabilidad.

4.7. Consideraciones éticas

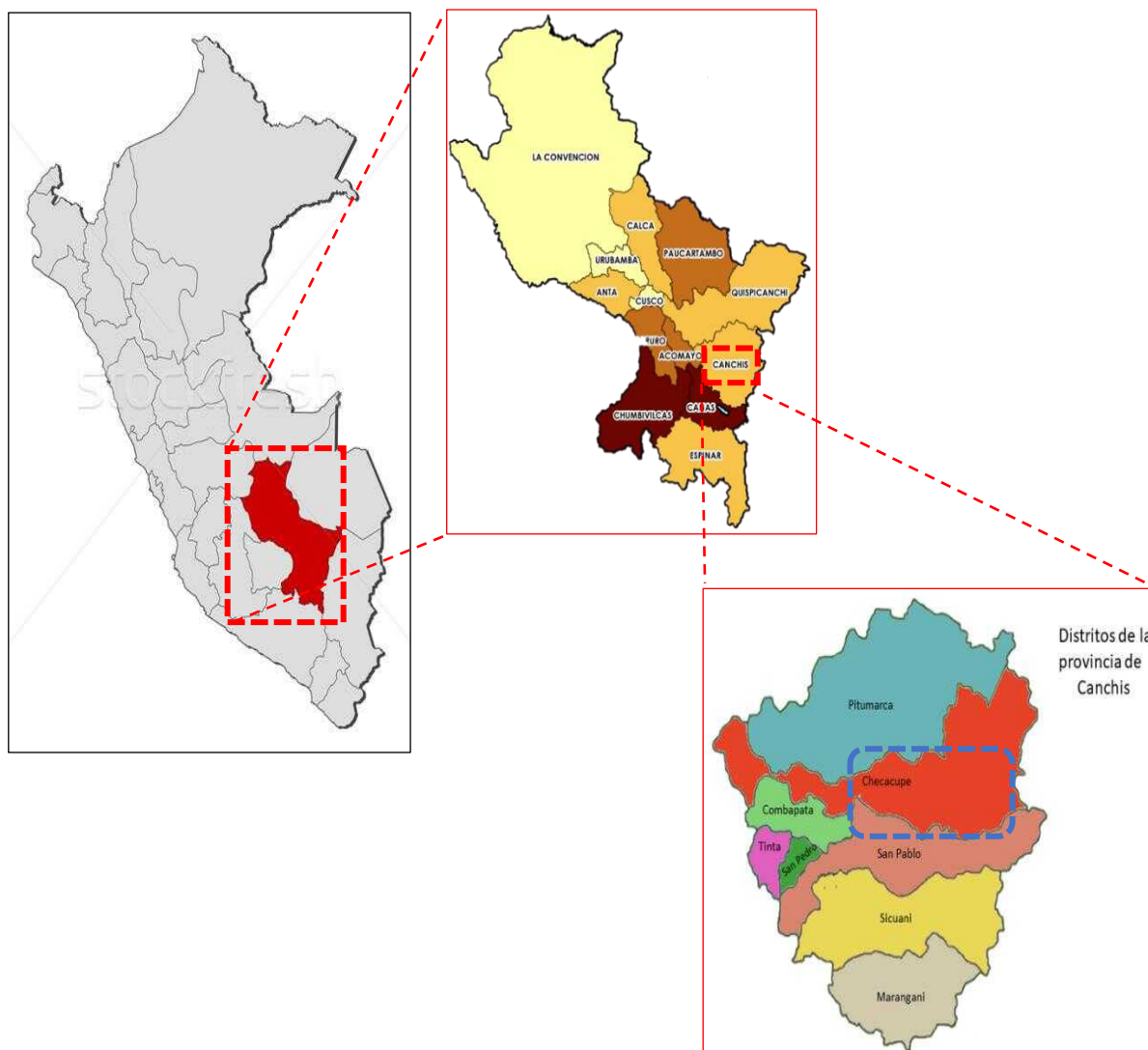
Esta investigación se rigió por estrictos principios éticos. Durante los estudios de campo, se priorizó la seguridad, se obtuvo el acceso correspondiente y se minimizó la alteración del entorno.

V. Resultados y discusión

Este capítulo presenta los resultados y el análisis del talud situado en el sector Chuquicahuana, distrito de Checacupe, provincia de Canchis, en el departamento de Cusco, Perú. El área crítica de estudio se encuentra entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 de la carretera Red Departamental CU-117, con coordenadas UTM del centroide (Zona 19S, WGS84): Este 230990.02, Norte 8452223.84, a una altitud de 3,416 msnm.

Figura 19.

Ubicación política general de la zona de estudio

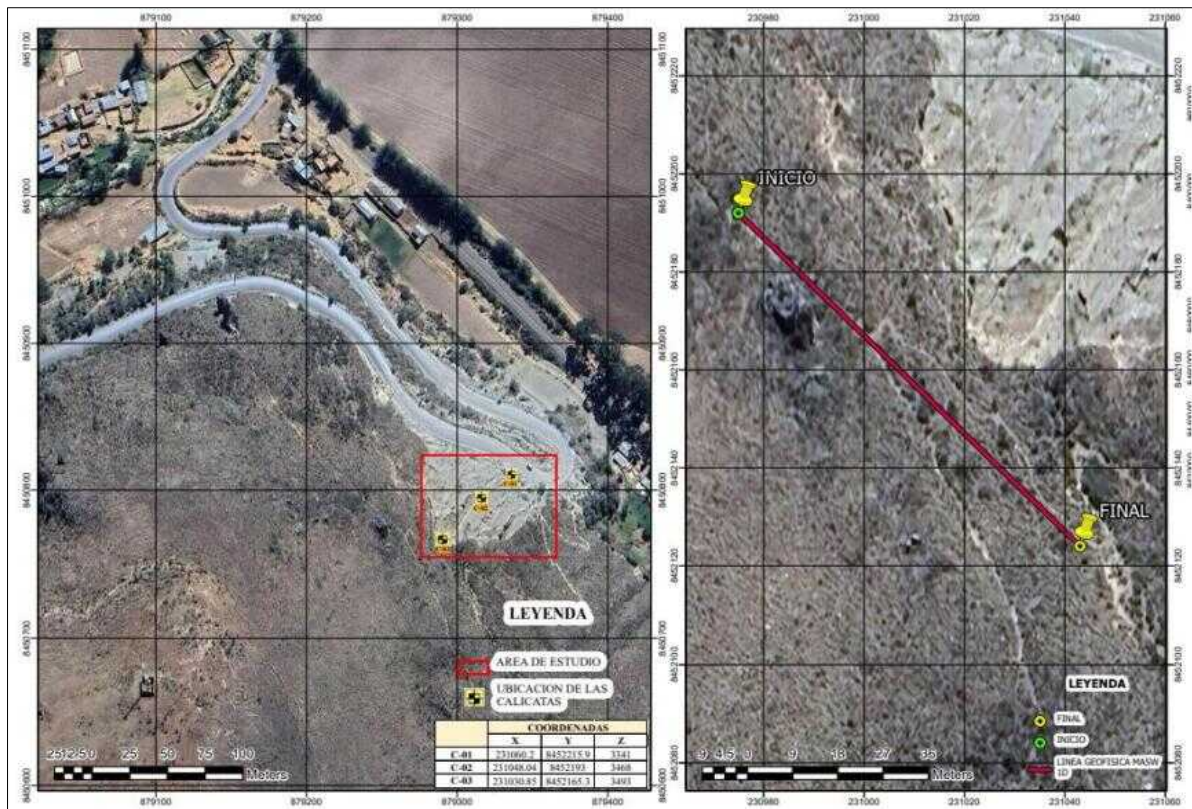


5.1. Resultados de propiedad física y mecánica del suelo natural

Los ensayos de laboratorio hechos con muestras de las calicatas C-01, C-02 y C-03 mostraron que el suelo principal del talud es granular y contiene finos. Además, el estudio geofísico en campo concedió información clave sobre el comportamiento dinámico del subsuelo y los parámetros sísmicos del lugar, datos esenciales para analizar la estabilidad del talud en condiciones dinámicas.

Figura 20.

Estudio de las tres calicatas y estudio geofísico in situ

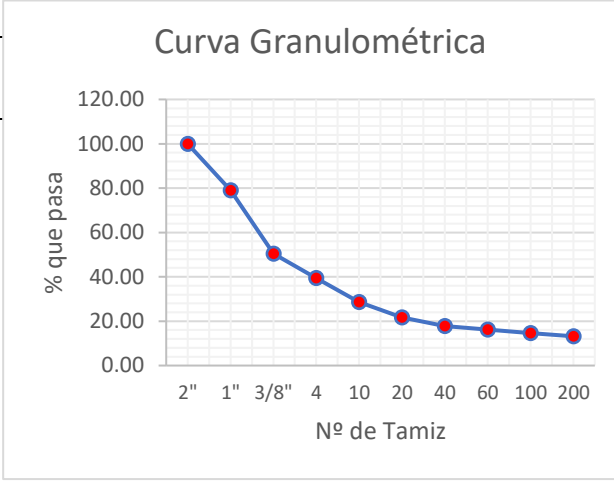


Nota. Ubicación física donde se realizaron las exploraciones de las tres calicatas ubicadas estratégicamente, en el pie del talud, en la zona intermedia y en el hombro del talud como se observa en el lado izquierdo de la figura 17. El estudio geofísico se realizó con la instalación de 24 geófonos en una línea recta horizontal de 90 m.

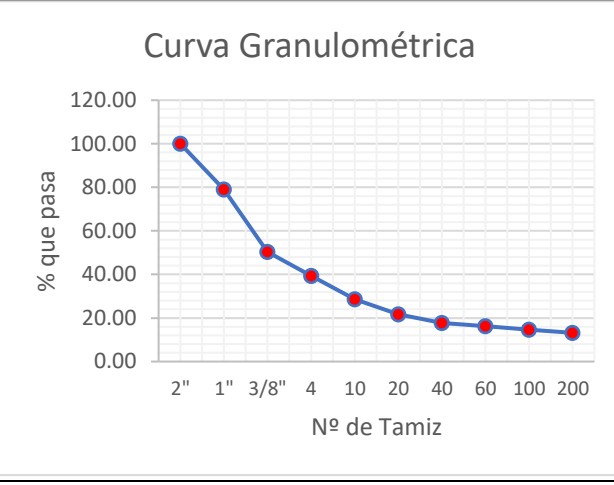
Tabla 5.

Resultados de análisis granulométrico

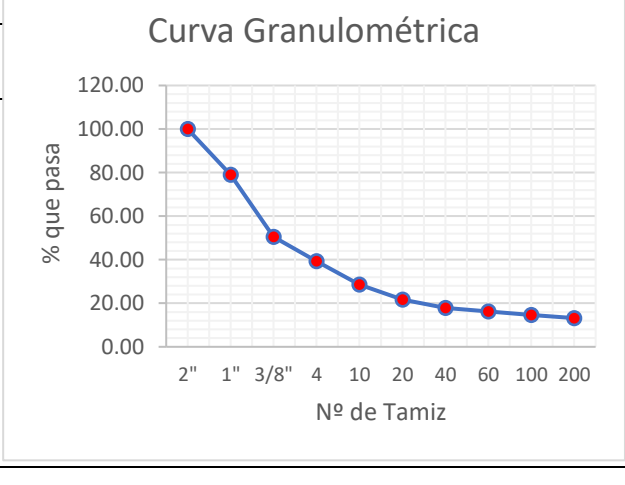
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO CALICATA (C - 01)			
Peso inicial seco (gr)	999.32		
Tamiz Nº	Peso retenido	% Retenido	% que pasa
1"	210.33	21.0	78.95
3/8"	285.13	28.5	50.42
4	110.29	11.0	39.38
10	107.59	10.8	28.62
20	68.77	6.9	21.74
40	39.45	3.9	17.79
60	15.79	1.6	16.21
100	16.12	1.6	14.59
200	13.98	1.4	13.20
Bandeja	131.87	13.2	0.00



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO CALICATA (C - 02)			
Peso inicial seco (gr)	1008.22		
Tamiz Nº	Peso retenido	% Retenido	% que pasa
1"	197.55	19.6	80.41
3/8"	298.1	29.6	50.84
4	121.49	12.0	38.79
10	99.97	9.9	28.87
20	71.97	7.1	21.74
40	40.6	4.0	17.71
60	15.77	1.6	16.14
100	16.11	1.6	14.55
200	14.04	1.4	13.15
Bandeja	132.62	13.2	0.00



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO CALICATA (C - 03)			
Peso inicial seco (gr)	801.16		
Tamiz Nº	Peso retenido	% Retenido	% que pasa
1"	215.95	27.0	73.05
3/8"	189.44	23.6	49.40
4	87.68	10.9	38.46
10	76.75	9.6	28.88
20	45.85	5.7	23.15
40	41.99	5.2	17.91
60	32.58	4.1	13.84
100	16.4	2.0	11.80
200	12.43	1.6	10.25
Bandeja	82.09	10.2	0.00



Nota. Se aprecia en las tres calicatas no hay mucha diferencia en estratos del suelo del talud.

Tabla 6.*Resultados de ensayo de límites de consistencia*

ENSAYOS DE LIMITE DE CONSISTENCIA CALICATA (C - 01)		
Ensayos	Porcentaje (%)	
Limite Liquido (LL)	19.82	<p>Limites de consistencia</p> <p>25.00 20.00 15.00 10.00 5.00 0.00</p> <p>19.82 17.19 2.63</p> <p>Limite Liquido (LL) Limite Plastico (LP) Indice de Plasticidad (IP)</p> <p>■ Porcentaje (%) 19.82 17.19 2.63</p>
Limite Plástico (LP)	17.19	
Índice de Plasticidad (IP)	2.63	
ENSAYOS DE LIMITE DE CONSISTENCIA CALICATA (C - 02)		
Ensayos	Porcentaje (%)	
Limite Liquido (LL)	19.21	<p>Limites de consistencia</p> <p>25.00 20.00 15.00 10.00 5.00 0.00</p> <p>19.21 16.94 2.27</p> <p>Limite Liquido (LL) Limite Plastico (LP) Indice de Plasticidad (IP)</p> <p>■ Porcentaje (%) 19.21 16.94 2.27</p>
Limite Plástico (LP)	16.94	
Índice de Plasticidad (IP)	2.27	
ENSAYOS DE LIMITE DE CONSISTENCIA CALICATA (C - 03)		
Ensayos	Porcentaje (%)	
Limite Liquido (LL)	NP	<p>Limites de consistencia</p> <p>1.00 0.00</p> <p>NP</p> <p>Indice de Plasticidad (IP) Limite Plastico (LP) Limite Liquido (LL)</p>
Limite Plástico (LP)	NP	
Índice de Plasticidad (IP)	NP	

Nota. Los bajos valores del Índice de Plasticidad ($IP < 3$) confirman un comportamiento no plástico, típico de suelos granulares con finos no arcillosos. C-03 presenta material no plástico (NP), consistente con un menor contenido de finos.

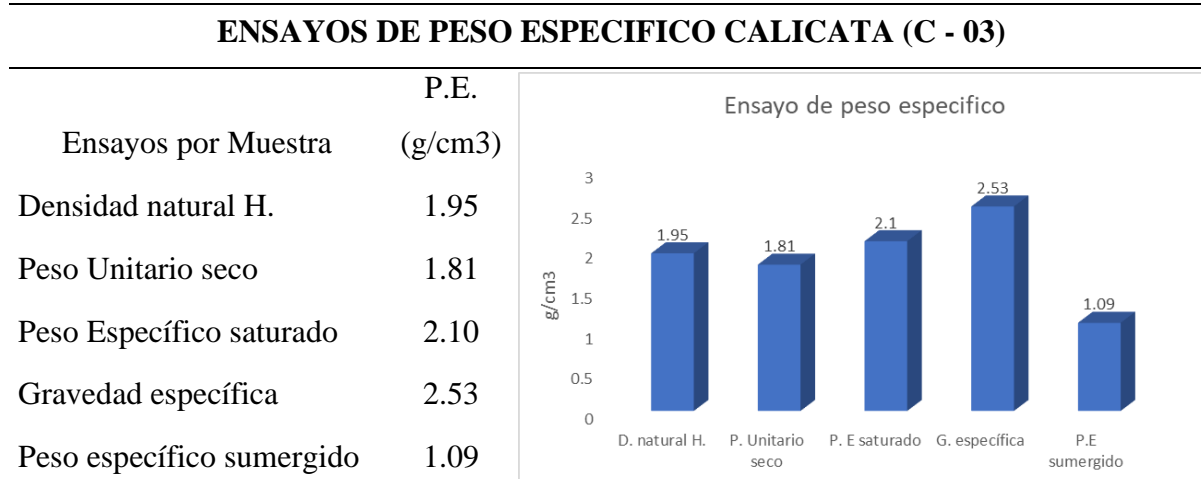
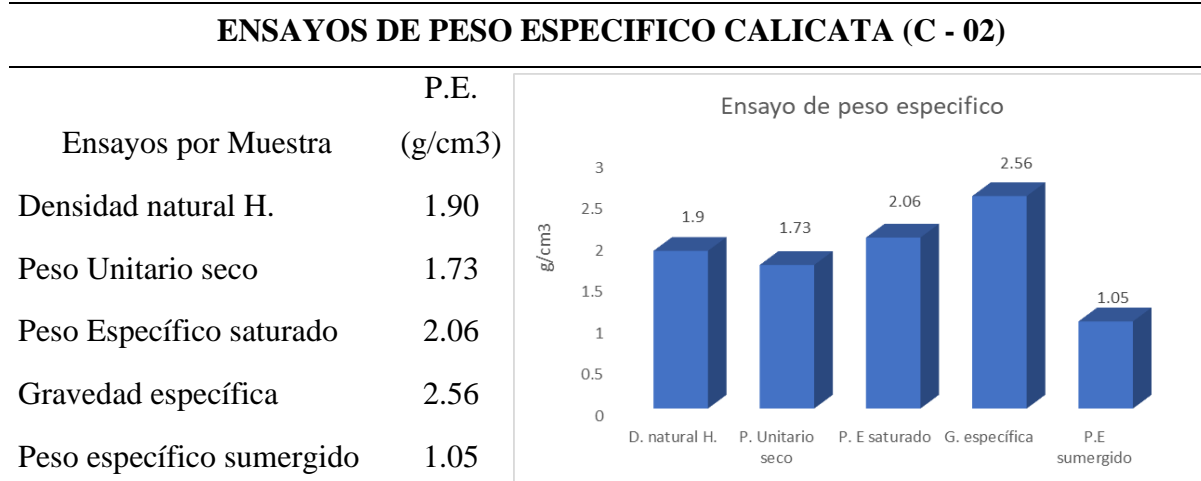
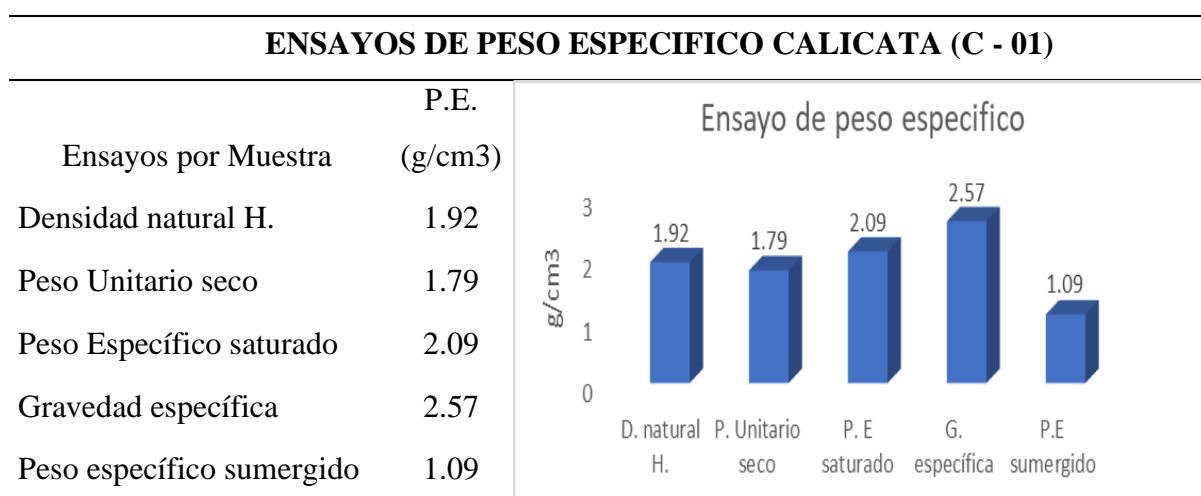
Tabla 7.*Resultados de ensayo de humedad*

ENSAYOS DECONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL CALICATA (C - 01)	
Ensayos por Muestra	% de Humedad
Muestra 01	7.66
Muestra 02	7.38
Muestra 03	8.65
Promedio	7.90

ENSAYOS DECONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL CALICATA (C - 02)	
Ensayos por Muestra	% de Humedad
Muestra 01	6.95
Muestra 02	9.50
Muestra 03	8.92
Promedio	8.46

ENSAYOS DECONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL CALICATA (C - 03)	
Ensayos por Muestra	% de Humedad
Muestra 01	6.18
Muestra 02	7.39
Muestra 03	7.14
Promedio	6.90

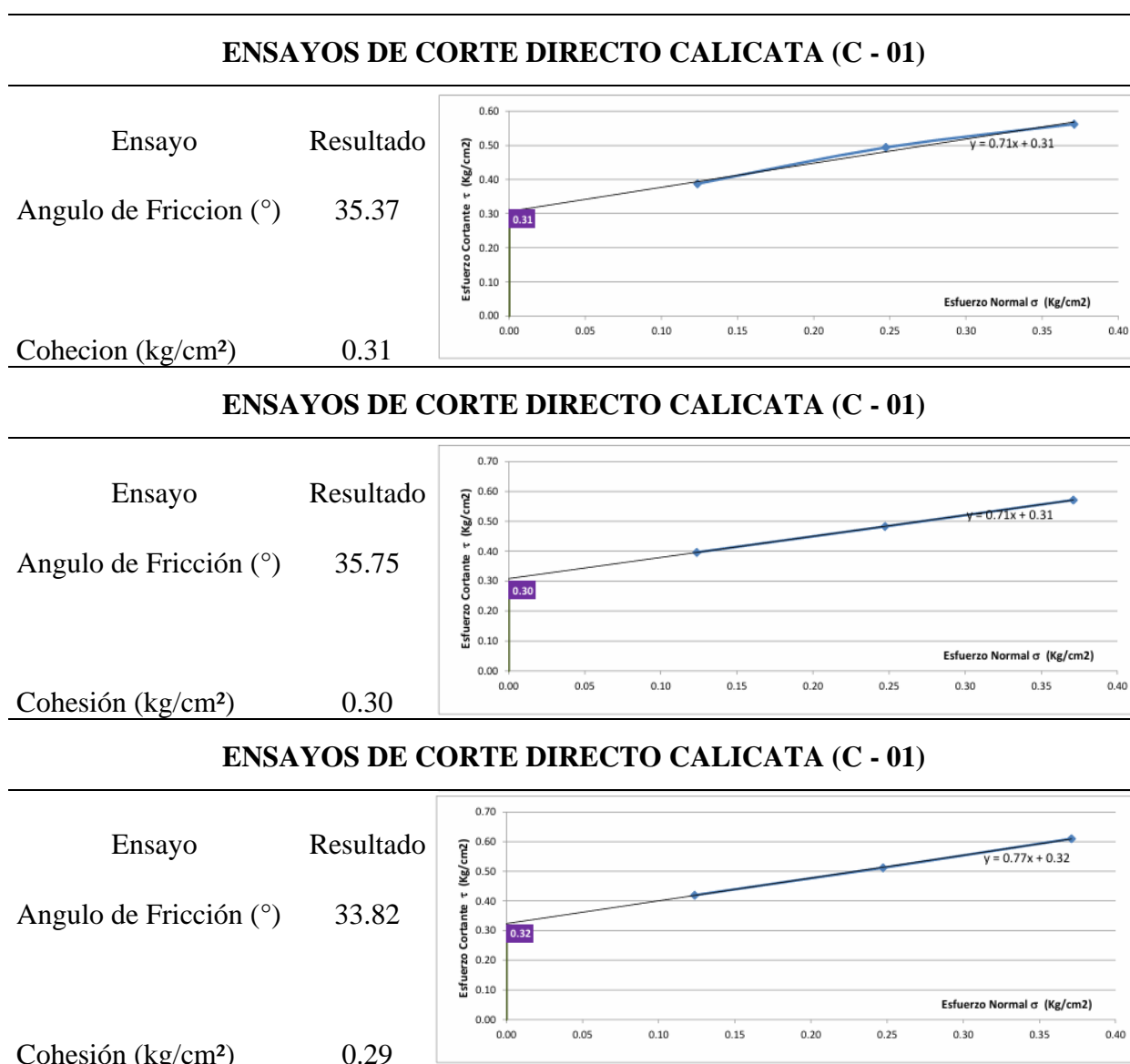
Nota. El contenido de humedad natural promedio es bajo (7.09% a 8.46%), característico de un suelo granular parcialmente saturado en condiciones de campo, lo que influye en su peso unitario y resistencia al corte.

Tabla 8.*Resultados de ensayo peso especifico*

Nota. Los valores de peso unitario seco (1.73 a 1.81 g/cm³) y gravedad específica (2.55) son típicos de gravas arenosas. El peso saturado muestra el aumento esperado por la ocupación de vacíos con agua.

Tabla 9.

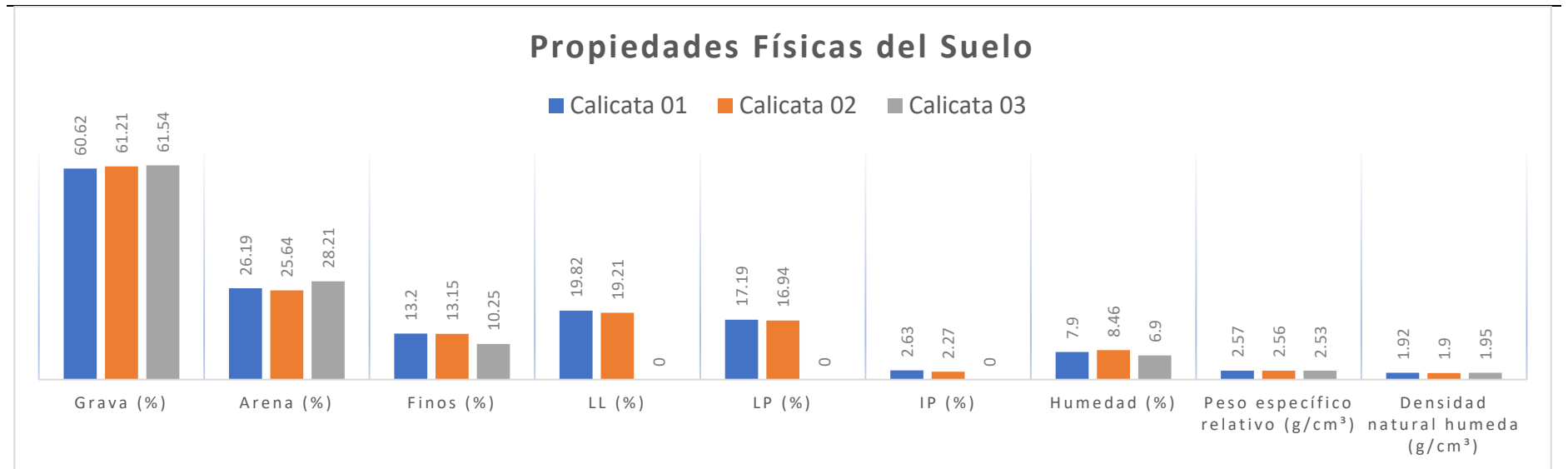
Resultado de ensayo corte directo



Nota. Los ensayos revelan una resistencia al corte predominantemente friccional ($\phi = 35^\circ$ a 38°) con cohesión baja ($c = 0.30 \text{ kg/cm}^2$), parámetros clave para el análisis de estabilidad del talud granular. La mínima diferencia entre resistencia pico y residual indica un comportamiento post-falla estable, pero insuficiente para garantizar la estabilidad del talud en su estado natural bajo condiciones estáticas y sísmicas. Estos resultados justifican técnicamente la necesidad de incorporar sistemas de refuerzo como geosintéticos para aumentar la resistencia al corte aparente del suelo.

Tabla 10.*Resumen de resultados de propiedades físicas del suelo*

Calicata	Estrato	Profundidad de exploración	Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS	Humedad (%)	Peso específico relativo (g/cm ³)	Densidad natural húmeda (g/cm ³)
C-01	E2	2.80 m	60.62	26.19	13.2	19.82	17.19	2.63	GM	7.9	2.57	1.92
C-02	E2	1.60 m	61.21	25.64	13.15	19.21	16.94	2.27	GM	8.46	2.56	1.9
C-03	E2	1.50 m	61.54	28.21	10.25	NP	NP	NP	GW-GM	6.9	2.53	1.95

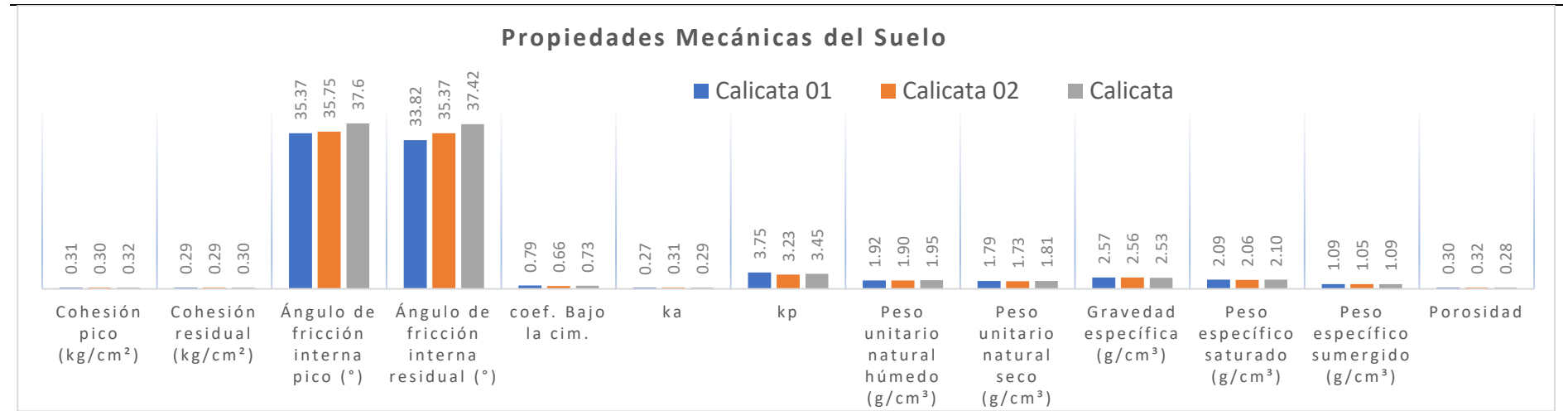


Nota. Los tres perfiles (C-01, C-02, C-03) presentan una composición granulométrica homogénea, dominada por grava (promedio = 61%) y arena (= 26%), con un contenido de finos bajo (promedio = 12%). La clasificación SUCS (GM y GW-GM) confirma un suelo granular limoso.

Tabla 11.

Resumen de resultados propiedades mecánicas del suelo

Calicata	Estrato	Cohesión pico (kg/cm ²)	Cohesión residual (kg/cm ²)	Ángulo de fricción interna pico (°)	Ángulo de fricción interna residual (°)	Coef. Bajo la cim.	ka	kp	Peso unitario natural húmedo (g/cm ³)	Peso unitario natural seco (g/cm ³)	Gravedad específica (g/cm ³)	Peso específico saturado (g/cm ³)	Peso específico sumergido (g/cm ³)	Porosidad
C-01	E2	0.31	0.29	35.37	33.82	0.79	0.27	3.75	1.92	1.79	2.57	2.09	1.09	0.30
C-02	E2	0.30	0.29	35.75	35.37	0.66	0.31	3.23	1.90	1.73	2.56	2.06	1.05	0.32
C-03	E2	0.32	0.30	37.6	37.42	0.73	0.29	3.45	1.95	1.81	2.53	2.1	1.09	0.28

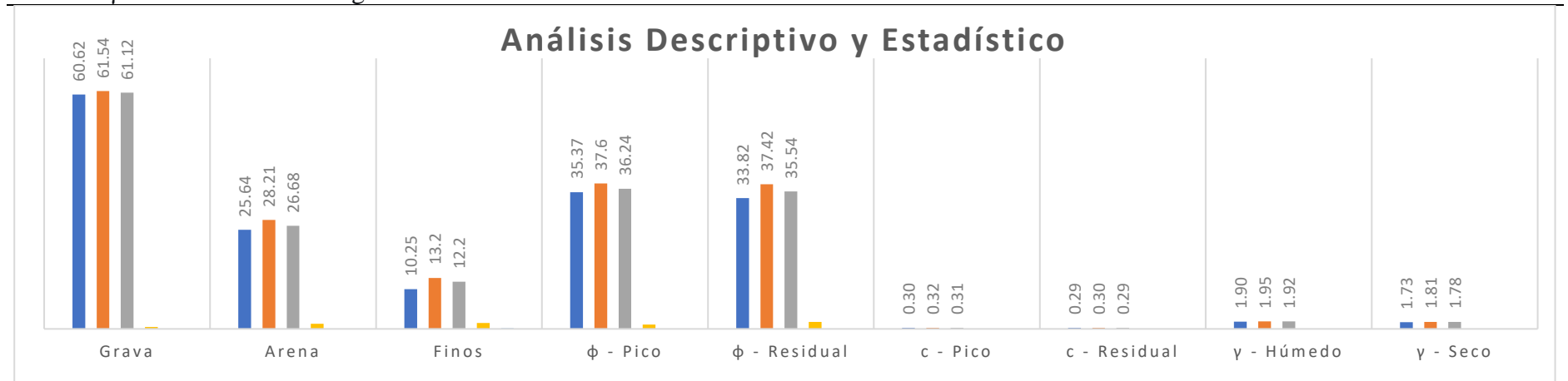


Nota. Los parámetros de resistencia al corte muestran un ángulo de fricción interna (ϕ) alto (promedio 36.24° pico), característico de suelos granulares, y una cohesión (c) baja (promedio 0.31 kg/cm²). Existe una diferencia mínima entre los valores pico y residual sugiere un comportamiento frágil limitado.

Tabla 12.

Resumen de análisis descriptivo y estadístico de los ensayos

Parámetro	Unidad	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Estándar	Coef. Variación (CV)
Grava	%	60.62	61.54	61.12	0.47	0.77%
Arena	%	25.64	28.21	26.68	1.31	4.91%
Finos	%	10.25	13.2	12.2	1.5	12.30%
ϕ - Pico	°	35.37	37.6	36.24	1.14	3.15%
ϕ - Residual	°	33.82	37.42	35.54	1.79	5.04%
c - Pico	kg/cm ²	0.3	0.32	0.31	0.01	3.23%
c - Residual	kg/cm ²	0.29	0.3	0.29	0.01	3.45%
γ - Húmedo	g/cm ³	1.9	1.95	1.92	0.03	1.56%
γ - Seco	g/cm ³	1.73	1.81	1.78	0.04	2.25%



Nota. Los estadísticos descriptivos confirman la baja variabilidad ($CV < 5\%$ en la mayoría de parámetros clave) de las propiedades del estrato

E2, justificando el tratamiento como un material homogéneo para el modelamiento. Estos resultados sustentan la extrapolación de las

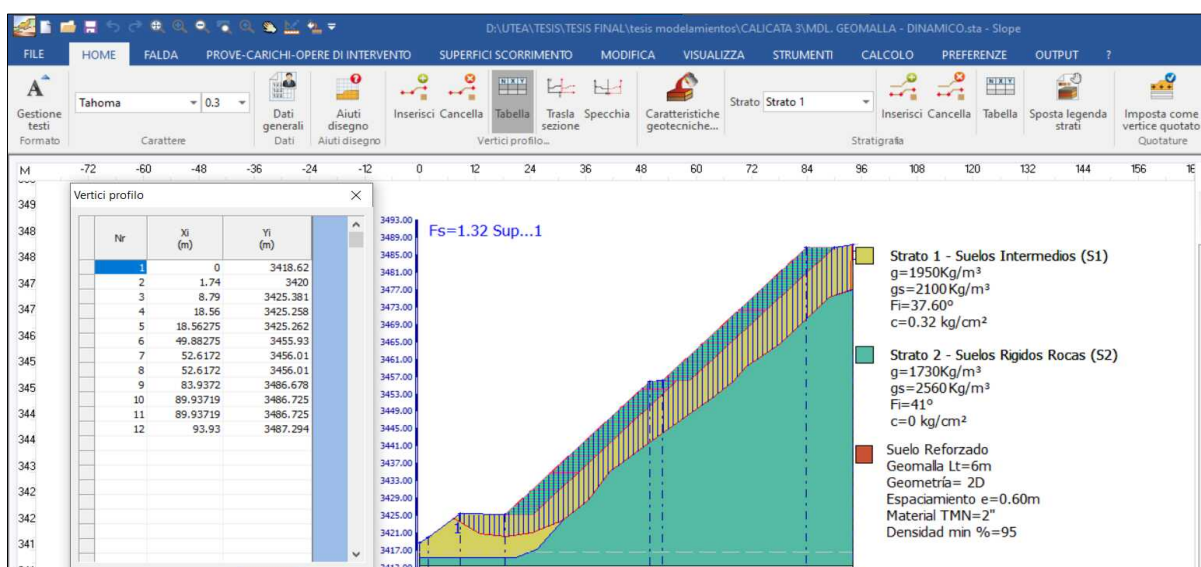
conclusiones a lo largo del tramo de talud estudiado.

5.1.1. Resultados de análisis de modelamientos en software *geostru slope*

se presenta la metodología de modelamiento numérico realizada con el software *Geostru Slope*, donde se analiza la estabilidad del talud bajo diferentes escenarios. Inicialmente, se modelan las condiciones del suelo en estado seco y saturado, variando los parámetros de peso unitario y resistencia para simular el efecto de la humedad y la presión de poros. Se emplean distintos métodos de equilibrio límite como: Janbu, Morgenstern-Price y Bell para contrastar los resultados y garantizar robustez en el análisis. Adicionalmente, se realiza un modelamiento diferenciado para cada calicata, considerando sus propiedades geotécnicas particulares, con el fin de evaluar la variabilidad espacial del terreno. Finalmente, se aplica un análisis probabilístico mediante el método de Monte Carlo, el cual permite estimar la probabilidad de falla y el nivel de confiabilidad de cada alternativa de estabilización, incorporando la incertidumbre asociada a los parámetros del suelo y las solicitaciones externas.

Figura 21.

Proceso de modelación en el software Geostru Slope



Nota. Metodología de modelamiento numérico realizada con el software *GEOSTRU SLOPE*, donde se analiza la estabilidad del talud bajo diferentes escenarios.

Tabla 13.

Modelamiento en condición de su estado satura (γ) y seco (γ)

Método de Análisis	Condición del Talud	Condición de Estado	F.S. Estático	Cumple CE.020 (F.S. ≥ 1.5)	F.S. Dinámico	Cumple CE.020 (F.S. ≥ 1.25)
Janbu (Variación por estado saturado y seco)	Estado Natural	Saturado	1.26	NO	0.9	NO
	Estado Natural	Seco	1.28	NO	0.92	NO
	Geomalla Coextruída	Saturado	1.72	SÍ	1.27	SÍ
	Geomalla Coextruída	Seco	1.79	SÍ	1.33	SÍ
	Geocelda GW20V	Saturado	1.78	SÍ	1.32	SÍ
	Geocelda GW20V	Seco	1.87	SÍ	1.39	SÍ

	Saturado	Seco	Saturado	Seco	Saturado	Seco
	Estado Natural	Estado Natural	Geomalla Coextruída	Geomalla Coextruída	Geocelda GW20V	Geocelda GW20V
F.S. Estático	1.26	1.28	1.72	1.79	1.78	1.87
F.S. Dinámico	0.9	0.92	1.27	1.33	1.32	1.39

Nota. Los resultados del modelamiento con el método de Janbu en estado natural muestran un Factor de Seguridad (F.S.) estático de 1.26 (seco) y 1.26 (saturado), y un F.S. dinámico de 0.92 (seco) y 0.90 (saturado). Ningún valor cumple con los mínimos de la norma CE.020 (F.S. ≥ 1.50 estático; F.S. ≥ 1.25 dinámico). La saturación reduce marginalmente el F.S., Teniendo el análisis comparativo la estabilización de talud se trabajará en estado saturado optando la estabilización del talud en el más crítico.

Tabla 14.*Análisis de modelamiento por métodos en Geostru Slope*

Método de Análisis	Condición del Talud	F.S. Estático	Cumple CE.020 (F.S.≥1.5)	F.S. Dinámico	Cumple CE.020 (F.S.≥1.25)
Metodo Janbu	Estado Natural	1.26	NO	0.9	NO
	Geomalla Coextruída	1.72	SÍ	1.27	SÍ
	Geocelda GW20V	1.78	SÍ	1.32	SÍ
Metodo Morgenstern y Price	Estado Natural	1.49	NO	1.2	NO
	Reforzado Geomalla Coextruída	2.31	SÍ	2.12	SÍ
	Geocelda GW20V	2.76	SÍ	2.25	SÍ
Metodo Bell	Estado Natural	1.34	NO	1.1	NO
	Geomalla Coextruída	1.71	SÍ	1.43	SÍ
	Geocelda GW20V	1.76	SÍ	1.48	SÍ

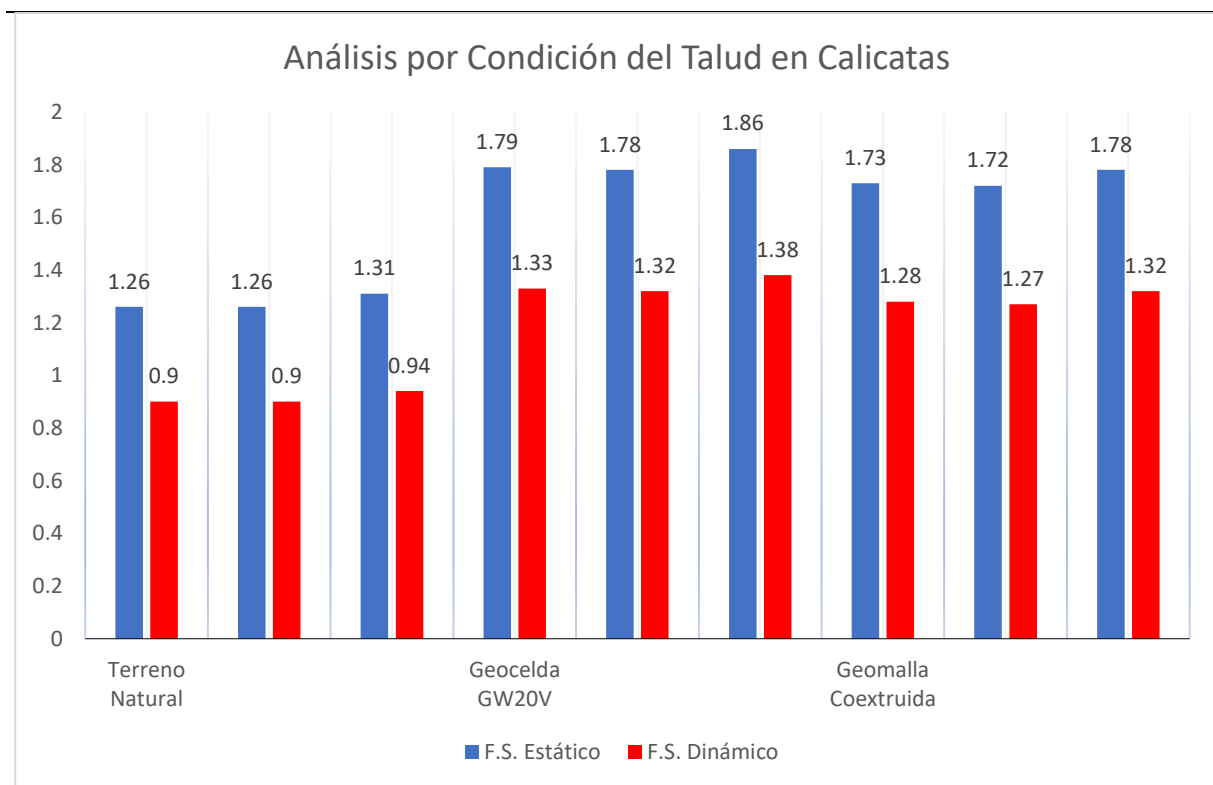
Método	Condición	F.S.	
		Estático	Dinámico
Metodo Janbu	Estado Natural	1.26	0.9
	Geomalla Coextruída	1.72	1.27
	Geocelda GW20V	1.78	1.32
Metodo Morgenstern-Price	Estado Natural	1.49	1.2
	Reforzado Geomalla Coextruída	2.31	2.12
	Geocelda GW20V	2.76	2.25
Metodo Bell	Estado Natural	1.34	1.1
	Geomalla Coextruída	1.71	1.43
	Geocelda GW20V	1.76	1.48

Nota. Se aplicaron tres métodos de equilibrio límite (Janbu, Morgenstern-Price, Bell) para robustecer el análisis. Todos los métodos coinciden en que el talud natural es inestable (F.S. < 1.5 estático, <1.25 dinámico). Los métodos más refinados (Morgenstern-Price) arrojan F.S. ligeramente mayores, pero aún por debajo del límite. Para el talud reforzado, todos los métodos logran la estabilización. Se determina que el método Janbu es el más conservador y eficaz.

Tabla 15.

Resumen: Análisis comparativo por calicata en Condición del Talud.

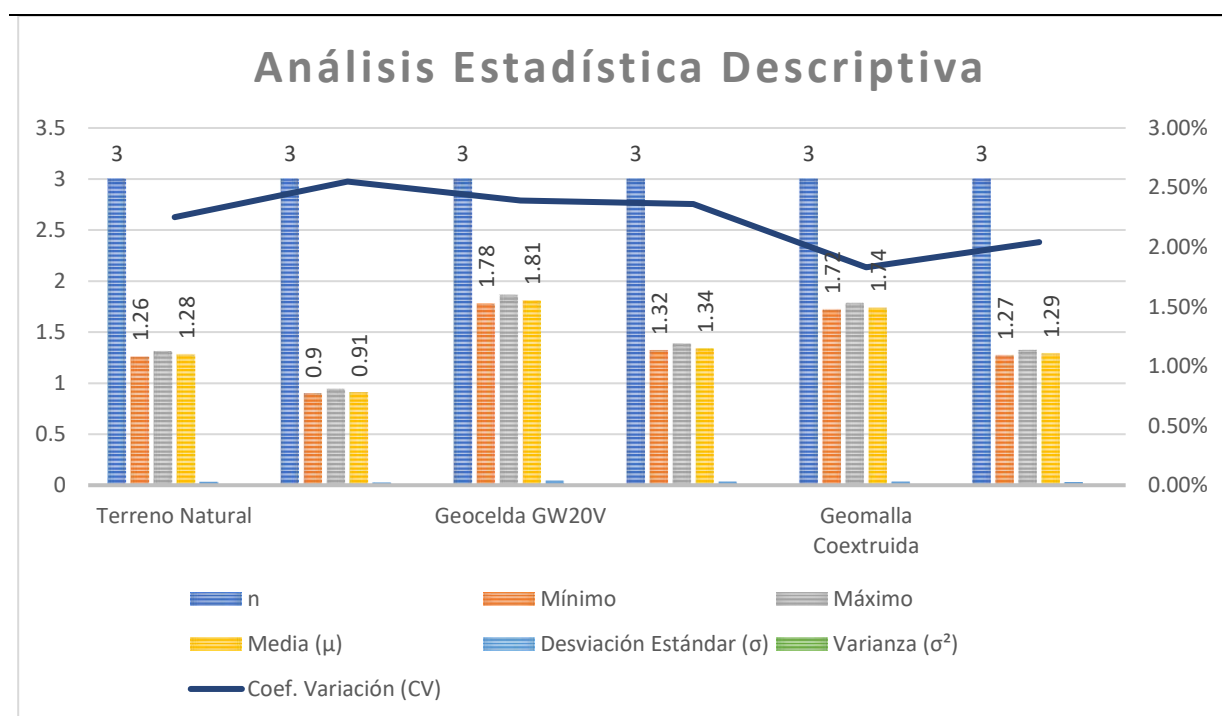
Condición del Talud	Calicata	F.S. Estático	Cumple CE.020 (F.S. ≥ 1.5)	F.S. Dinámico	Cumple CE.020 (F.S. ≥ 1.25)
Terreno Natural	C-01	1.26	NO	0.9	NO
	C-02	1.26	NO	0.9	NO
	C-03	1.31	NO	0.94	NO
Geocelda GW20V	C-01	1.79	SÍ	1.33	SÍ
	C-02	1.78	SÍ	1.32	SÍ
	C-03	1.86	SÍ	1.38	SÍ
Geomalla Coextruida	C-01	1.73	SÍ	1.28	SÍ
	C-02	1.72	SÍ	1.27	SÍ
	C-03	1.78	SÍ	1.32	SÍ



Nota. Las soluciones de refuerzo cumplen con la norma CE.020, siendo la Geocelda GW20V la de mejor desempeño mecánico. El terreno natural evidencia una inestabilidad crítica en todos los puntos, confirmando la necesidad de intervención. La calicata C-02 se destaca como la más crítica, presentando los valores más conservadores tanto en estado natural como reforzado, lo cual se trabajará con la calicata C-02 para la estabilización.

Tabla 16.*Estadística Descriptiva por Condición del Talud por calicatas*

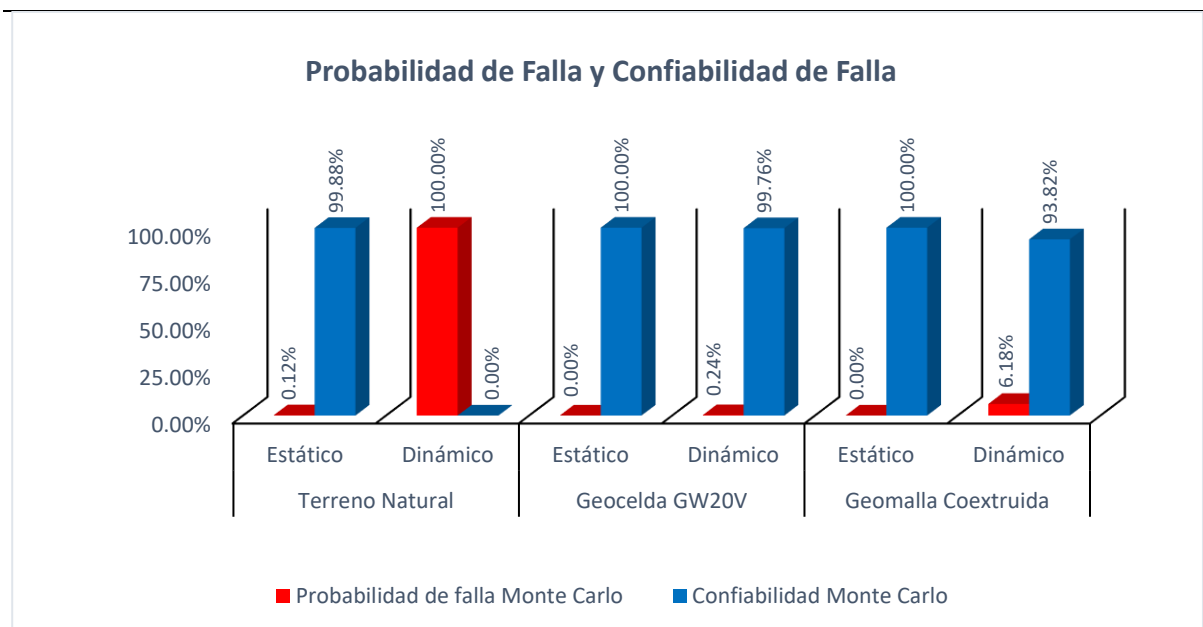
Condición del Talud	Estado	No de Calicatas	Mínimo	Máximo	Media (μ)	Desviación Estándar (σ)	Varianza (σ^2)	Coef. Variación (CV)
Terreno Natural	Estático	3	1.26	1.31	1.28	0.029	0.00083	2.25%
	Dinámico	3	0.9	0.94	0.91	0.023	0.00053	2.55%
Geocelda GW20V	Estático	3	1.78	1.86	1.81	0.043	0.00186	2.39%
	Dinámico	3	1.32	1.38	1.34	0.032	0.00102	2.36%
Geomalla Coextruida	Estático	3	1.72	1.78	1.74	0.032	0.00101	1.83%
	Dinámico	3	1.27	1.32	1.29	0.026	0.00069	2.04%



Nota. Los datos estadísticos descriptivos confirman una alta homogeneidad geotécnica entre las tres calicatas, evidenciada por los bajos coeficientes de variación ($CV < 2.55\%$ en el estado natural y $< 2.39\%$ en las opciones reforzadas). Esta baja dispersión justifica el tratamiento del estrato como un material uniforme para el modelamiento.

Tabla 17.*Resultado de Probabilidad de Falla y Confiabilidad de falla*

Condición del Talud	Estado	μ	σ	B	Probabilidad de falla Monte Carlo	Confiabilidad de falla Monte Carlo
Terreno Natural	Estático	1.28	0.029	-7.59	0.12%	99.88%
	Dinámico	0.91	0.023	-14.78	100.00%	0.00%
Geocelda GW20V	Estático	1.81	0.043	7.21	0.00%	100.00%
	Dinámico	1.34	0.032	2.81	0.24%	99.76%
Geomalla Coextruida	Estático	1.74	0.032	7.5	0.00%	100.00%
	Dinámico	1.29	0.026	1.54	6.18%	93.82%



Nota. El análisis probabilístico mediante el método de Monte Carlo, que incorpora la variabilidad de los parámetros de entrada, cuantifica el riesgo asociado a cada condición. Los resultados son concluyentes: el talud natural en estado dinámico presenta una probabilidad de falla del 100%, confirmando un riesgo inaceptable. Ambas soluciones con geosintéticos incrementan drásticamente la confiabilidad a niveles superiores al 99.76% en estático. La Geocelda GW20V demuestra una confiabilidad dinámica superior (99.76%) frente a la Geomalla Coextruida (93.82%), ofreciendo un mayor margen de seguridad ante eventos sísmicos.

5.1.2. Resultados de Estudio Geofísico para Estabilización Dinámica

El estudio geofísico se realizó para la estabilización de un talud en condiciones geotécnicas y sísmicas locales. Para determinar parámetros sísmicos mediante el método *MASW-ID* (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales).

Tabla 18.

Resultado de parámetros dinámicos del suelo y su clasificación.

PROF. (m)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	$(V_p/V_s)^2$	COEFICIENTE DE POISSON (ν) [Kramer 1996]	MODULO DE CORTE	MODULO DE YOUNG	MODULO	MODULO DE CORTE	MODULO DE YOUNG	MODULO
					Gd	Ed	VOLUMETRICO Kd	Ge	Ee	VOLUMETRICO Ke
					DINAMICO	DINAMICO	DINAMICO	ESTATICO	ESTATICO	ESTATICO
					kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2
0.00	357.79	1687.15	22.24	0.48	2411.05	7119.62	50396.17	2411.05	668.97	50396.17
3.00	406.18	1740.86	18.37	0.47	3135.30	9225.39	53412.86	3135.30	865.65	53412.86
7.50	556.06	1907.22	11.76	0.45	6035.68	17546.33	62957.62	6035.68	1642.83	62957.62
13.50	687.83	2053.49	8.91	0.44	9444.20	27139.11	71584.25	9444.20	2538.79	71584.25
21.00	904.22	2293.68	6.43	0.41	16894.31	47574.26	86182.02	16894.31	4447.44	86182.02
30.00	904.22	2293.68	6.43	0.41	16894.31	47574.26	86182.02	16894.31	4447.44	86182.02

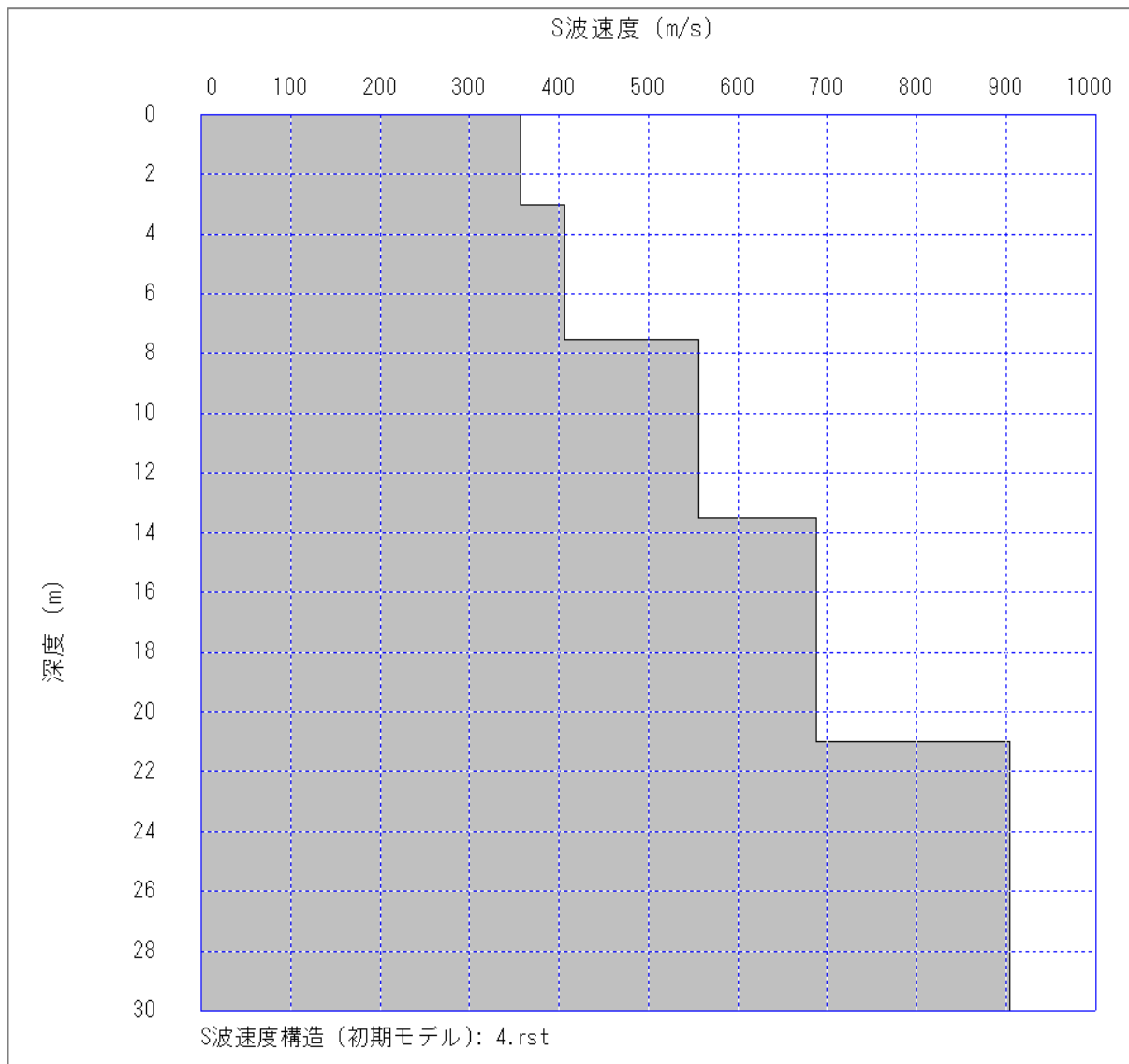
<p>Determinación del V_{s30}: $V_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{d_i}{V_{si}} \right)}$</p> <p>Donde el subíndice i se refiere a uno cualquiera de los n estratos con distintas características, d_i es el espesor de cada uno de los n estratos y V_{si} es la correspondiente velocidad de ondas de corte (m/s).</p>	PROFUNDIDAD	(m)	30.0	
	V_s 30	(m/s)	707	
	PERFIL DEL SUELO		S1	
	DESCRIPCION	SUELOS RIGIDOS O ROCAS		
	T_s	0.17		

SONDEO	CLASIFICACION DEL PERFIL DE SUELO E030			
	VS(m/s)	PERFIL	ESPESOR (m)	TIPO
MASW1D-01	400.00	S2	0.00 m a 7.00 m	SUELO S2 [SUELOS INTERMEDIOS] SUELOS DE DEPOSITACION RECIENTE, COMPUESTO POR GRAVAS Y ARENAS, EN UNA MATRIZ LIMOSA
	700.00	S1	De 7.00 m a mayores profundidades	SUELO S1 [SUELOS RÍGIDOS O ROCAS] BOLONERIAS DE ROCA CALIZA EN UNA MATRIZ LIMOSA

Nota. Resultados obtenidos mediante el método MASW-1D, mostrando el incremento de la velocidad de onda de corte (V_s) y de compresión (V_p) con la profundidad, así como los módulos de rigidez dinámicos (corte, Young y volumétrico). Se identifican dos zonas principales: desde 0 a 7 m suelos intermedios (S2, $V_s = 400$ m/s) compuestos por gravas y arenas en matriz limosa, y por debajo de 7 m suelos rígidos (S1, $V_s = 700$ m/s) con presencia de bolonerías de caliza.

Figura 22.

Perfil geosismico generalizado a partir de Vs.



Nota. Gráfico de perfil de velocidad de onda S en función de la profundidad.

Tabla 19.

Parámetros Sísmicos del terreno del proyecto.

Descripción	Valor
C. Horizontal (KH)	0.125
C. Vertical (KV)	0.083

Nota. Para el análisis dinámico se determinó coeficientes sísmicos. Tomado de Estudio de estabilidad de taludes (p. 51) por Jefferson Chara, 2025.

Tabla 20.*Propiedades mecánicas de las rocas*

Roca	Cohesión (MPa)	Ángulo de fricción (°)
Andesita	28	45
Arenisca	8-35	30-50
Basalto	20-60	48-55
Caliza	5-40	35-50
Caliza margosa	1-6	30
Cuarcita	25-70	40-55
Diabasa	90-120	40-50
Diorita	15	50-55
Dolomía	22-60	25-35
Esquisto	25 / 20-15*	25-30* / 20-30*
Gabro	30	35
Gneiss	15-40	30-40
Granito	15-50	45-58
Grauvaca	6-10	45-50
Mármol	15-35	35-45
Lutita	3-35	40-60 / 12-25*
Pizarra	10-50 / <10*	40-55 / 15-30*
Toba	0.7	-
Yeso	-	30

Nota. Para el modelamiento del del estrato 2 en el software GEOSTRU SLOPE se adoptaron los parámetros mecánicos del tipo de roca caliza según la clasificación del estudio en cual se tomó valor del ángulo de fricción (ϕ) de 41° , siendo esta dentro del parámetro (35° - 50°).

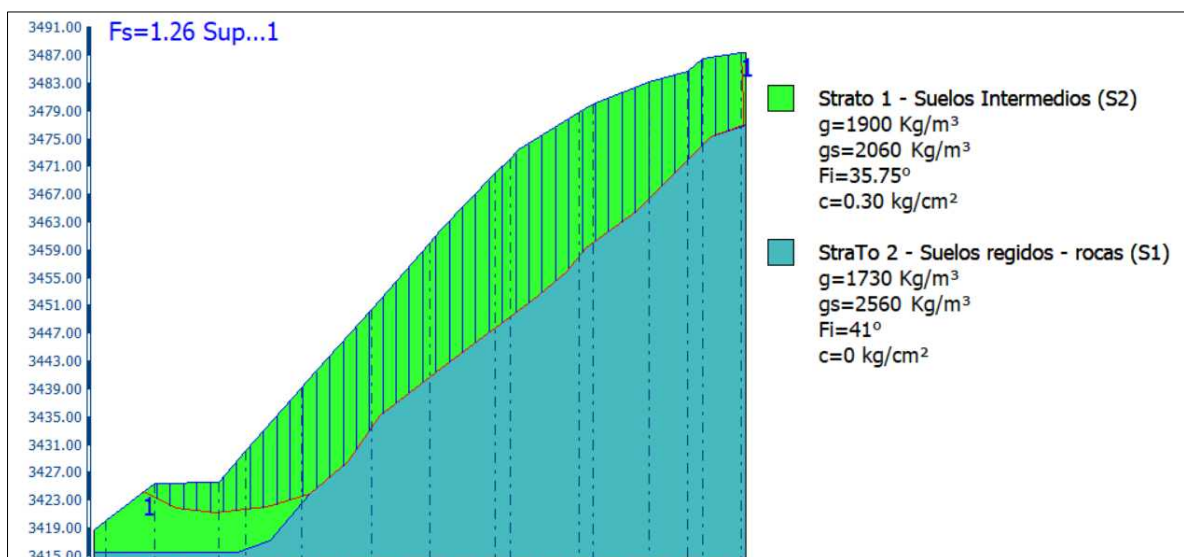
Fuente: González de Vallejo (2002), a partir de datos de Waltham (1999), Rahn (1986), Goodman (1989), Farmer (1968) y Jiménez Salas y Justo Alpañés (1975).

5.2. Análisis de Estabilidad del Talud en Condición Natural

El análisis realizado en GEOSTRU SLOPE, empleando el método de equilibrio límite y los parámetros geotécnicos obtenidos, determinó que el Factor de Seguridad estático y dinámico del talud natural se encuentra por debajo del valor mínimo establecido por la norma CE.020. Esto confirma que la estabilidad del talud es deficiente, especialmente ante incrementos de humedad y reducción de succión durante la temporada de lluvias, lo que explica los deslizamientos recurrentes reportados en el sector Chuquicahuana entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 de la carretera CU-117.

Figura 23.

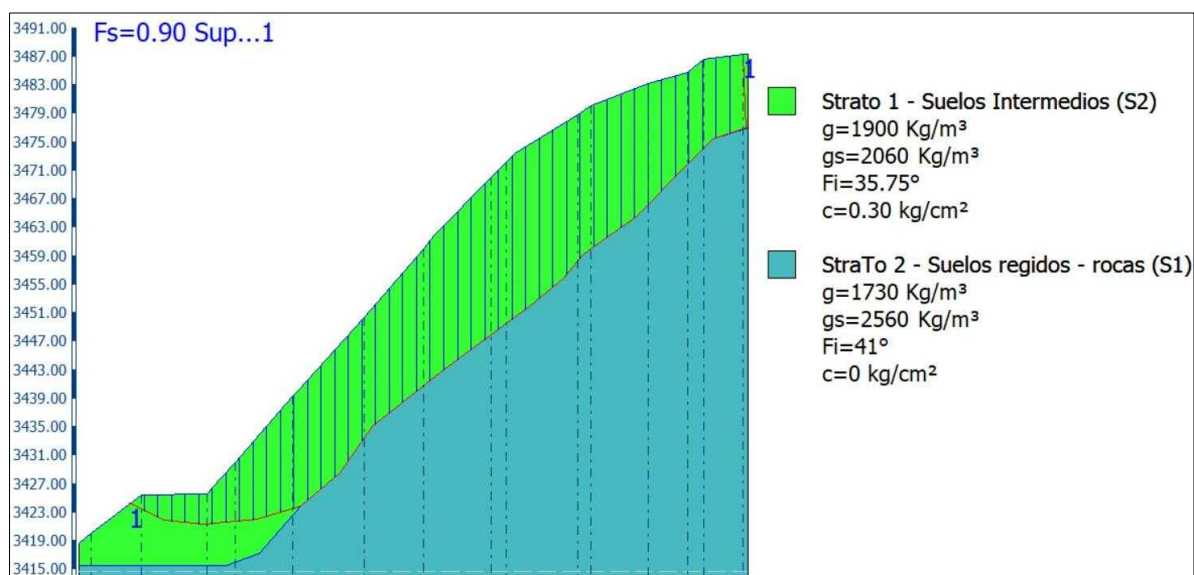
Modelamiento estático de talud en estado natural.



Nota. La figura presenta el modelamiento del talud en estado natural, considerando dos estratos (S1 y S2) con sus parámetros geotécnicos representativos. El análisis de estabilidad estática identifica una superficie crítica de falla (línea roja) de tipo traslacional/profunda y un factor de seguridad mínimo de F.S. = 1.26, evidenciando una condición cercana al límite de estabilidad y la necesidad de medidas de refuerzo.

Figura 24.

Modelamiento dinámico de talud en estado natural.



Nota. La figura presenta los resultados del análisis dinámico de estabilidad del talud en su condición natural, modelado como un sistema de dos estratos (S2: suelo granular superior; S1: sustrato rocoso inferior) con sus respectivos parámetros geotécnicos representativos. El análisis, que incorpora los coeficientes sísmicos horizontales (k_h) y verticales (k_v) conforme a la normativa peruana, identifica una superficie crítica de falla de mecanismo traslacional profundo. El Factor de Seguridad (F.S.) dinámico calculado es de 0.90, valor muy inferior al mínimo de 1.25 exigido por la norma CE.020. Este resultado confirma la condición de inestabilidad crítica del talud ante sollicitaciones sísmicas, la cual se agrava ante la eventual saturación del suelo por lluvias, que reduce la resistencia al corte. La falla potencial compromete la base del talud, representando un riesgo inminente para la integridad de la plataforma vial CU-117, por lo que se justifica técnicamente la necesidad urgente de una intervención de estabilización estructural.

5.1.3. Análisis técnicos del modelamiento en estado natural

Tabla 21.

Interpretación técnico modelamiento en estado natural del suelo

Ítem	Parámetro / Criterio	Valor / Resultado	Interpretación técnica	Implicancia en la estabilidad
1	Tipo de material modelado	Grava con arena / grava arenosa	Suelo granular con predominio friccional	La resistencia depende principalmente del ángulo de fricción
2	Peso unitario (γ)	1900 kg/m ³	Valor típico para gravas arenosas medianamente compactas	Incrementa esfuerzos normales en la superficie de falla
3	Peso específico saturado	2060 kg/m ³	Valor típico para gravas arenosas medianamente saturación.	Valor en estado saturado para estabilización de talud.
4	Ángulo de fricción (ϕ)	35.75°	Fricción moderada–alta para suelos granulares	Insuficiente para estabilizar la geometría actual
5	Cohesión (c)	0.30 kg/cm ²	Cohesión baja–moderada	Aporte limitado al equilibrio global del talud
6	Método de análisis	Janbu (GeoStru Slope)	Método de equilibrio límite para superficies no circulares	Adecuado para suelos granulares estratificados
7	Superficies ensayadas	Múltiples superficies (líneas rojas)	Zona de búsqueda amplia y representativa	Asegura identificación de la superficie crítica
8	Tipo de superficie crítica	Traslacional / planar	Falla controlada por fricción	Característica típica en suelos granulares

9	Profundidad de la falla	Profunda	Intercepta el pie del talud	Refuerzos superficiales resultan ineficaces
10	Factor de seguridad (FS) estático	1.26	Inferior al mínimo recomendado (FS \geq 1.50)	Talud inestable en condición estática
11	Factor de seguridad (FS) dinámico	0.90	Inferior al mínimo recomendado (FS \geq 1.25)	Talud inestable en condición dinámica
12	Condición analizada	Estática seca	No considera presión de poros	FS disminuirá con lluvias o sismo
13	Efecto de saturación	$u > 0$ (no modelado)	Reducción de succión matricial	Incremento del riesgo de deslizamiento
14	Relación pendiente a fricción	$\beta = 39$ a 40°	Pendiente mayor que ϕ'	Geometría desfavorable
15	Geometría equivalente	1V: 1.2H	Talud empinado	Requiere estabilización estructural
16	Mecanismo resistente dominante	Fricción	Cohesión secundaria	Alta sensibilidad a humedad
17	Comportamiento esperado	Pérdida de resistencia con humedad	Disminución de FS	Alta probabilidad de falla progresiva
18	Evaluación global	No estable	FS insuficiente	Necesaria intervención geotécnica

Nota. El análisis del talud en estado natural evidencia una condición de inestabilidad global, controlada por una superficie de falla profunda de tipo traslacional, gobernada principalmente por el comportamiento friccional del suelo granular, además sintetiza los parámetros geotécnicos empleados, los principales resultados del análisis de estabilidad estática y dinámica, y su interpretación técnica.

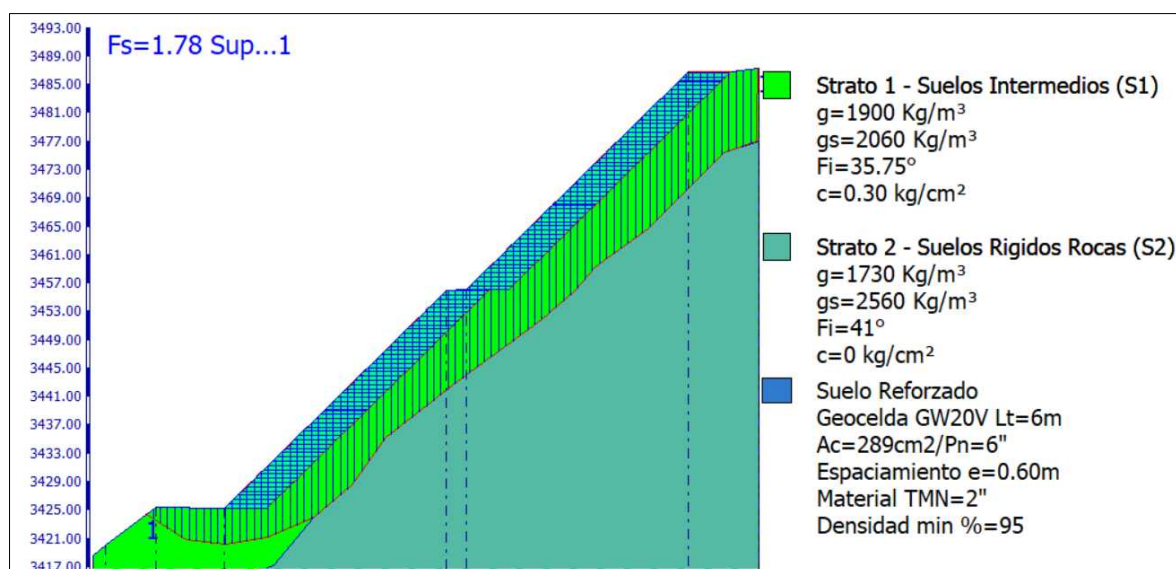
5.3. Análisis de estabilización del talud con geocelda GW20V

5.3.1. Análisis estático de estabilización del talud

El proceso de modelamiento para evaluar la estabilización estática con Geocelda GW20V se desarrolló en el software GEOSTRU SLOPE. Se incorporó la geometría del talud y los parámetros geotécnicos del suelo estratificado. El mecanismo principal modelado fue el aumento de la resistencia al corte aparente del suelo mediante el efecto de confinamiento 3D. El análisis se ejecutó utilizando el método de equilibrio límite de Janbu, configurando la búsqueda de superficies de falla no circulares para determinar la mejora en la estabilidad global aportada por este sistema de refuerzo 3D.

Figura 25.

Análisis de estabilidad estático con Geocelda GW20V



Nota. El modelamiento evidencia que el refuerzo con Geocelda GW20V en condición estática incrementa el Factor de Seguridad mediante confinamiento tridimensional, mejorando la resistencia al corte y el control de deformaciones. El sistema cumple con los criterios de estabilidad de la Norma CE. 020.

5.3.2. Análisis técnicos del modelamiento con geocelda GW20V

Tabla 22.

Interpretación del modelamiento estático con Geocelda GW20V.

Aspecto evaluado	Resultado del modelamiento	Interpretación técnica
Tipo de suelo	Estrato granular ($\gamma=1.90 \text{ kg/m}^3$, $\phi=35.75^\circ$, $c=0.30 \text{ kg/cm}^2$)	Comportamiento predominantemente friccional
Sistema de refuerzo	Geocelda GW20V + banquetas	Incrementa confinamiento y reduce masa activa
Tipo de falla	Traslacional o planar profunda	Intercepta el pie del talud
Método de análisis	Janbu (Geostru Slope)	Evaluación de estabilidad global
Factor de Seguridad	FS = 1.78 (estático)	Cumple CE.020 (FS ≥ 1.50)
Comparación con talud natural	FS natural = 1.26	Incremento significativo de estabilidad
Desempeño global	Estable en condición estática	Adecuado para pendientes pronunciadas

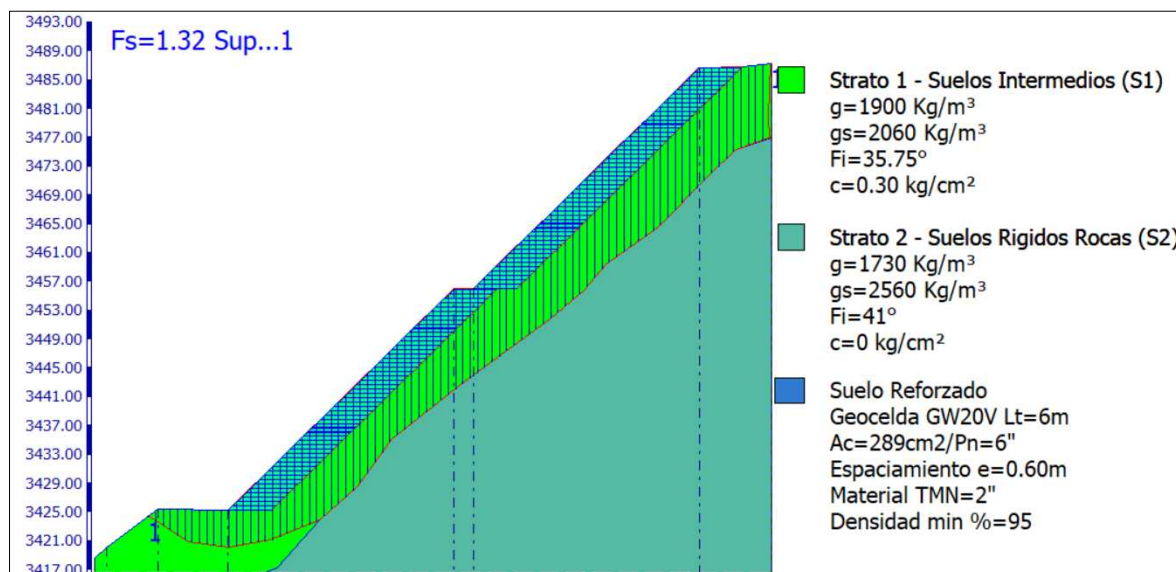
Nota. El refuerzo con Geocelda GW20V incrementa el F.S. estático a 1.78, superando el mínimo normativo (1.50). La superficie de falla crítica se desplaza y se hace menos profunda, evidenciando el efecto del confinamiento 3D. La Geocelda GW20V transforma el suelo granular en un compuesto coherente con mayor resistencia al corte aparente y rigidez.

5.3.3. Análisis dinámico de estabilización del talud -geocelda GW20V

En el análisis dinámico del talud reforzado con Geocelda GW20V se obtuvo un Factor de Seguridad (FS) = 1.32, valor que supera el mínimo establecido por la norma peruana CE.020, la cual requiere un $FS \geq 1.25$ para condiciones estática. Este resultado confirma que el confinamiento tridimensional proporcionado por la Geocelda GW20V mejora de manera eficaz la resistencia al corte del material granular, reduce los desplazamientos laterales y aporta una mayor rigidez estructural frente a solicitaciones sísmicas. La respuesta dinámica evidencia que la Geocelda GW20V no solo incrementa la estabilidad global del talud, sino que también ofrece un desempeño más consistente y seguro respecto al obtenido con la geomalla en el mismo escenario.

Figura 26.

Análisis dinámico con Geocelda GW20V



Nota. Bajo sollicitación sísmica, la Geocelda GW20V mantiene un F.S. de 1.32, cumpliendo con la norma CE.020 (≥ 1.25). Su estructura tridimensional ofrece un desempeño dinámico superior al redistribuir eficientemente las cargas inerciales, reducir desplazamientos laterales y mantener la integridad del macizo reforzado, incluso en estado saturado.

5.3.3. Análisis técnicos del modelamiento con geocelda GW20V

Tabla 23.

Interpretación de modelamiento dinámico con Geocelda GW20V

Aspecto evaluado	Resultado del modelamiento dinámico	Interpretación técnica
Factor de Seguridad sísmico	FS = 1.32 (> 1.25 CE.020)	El valor obtenido supera el mínimo exigido por la Norma CE.020, evidenciando estabilidad global adecuada del talud en condición sísmica.
Tipo de refuerzo	Geocelda GW20V (estructura 3D)	El sistema celular tridimensional confina el suelo en todas las direcciones, mejorando el comportamiento estructural del macizo reforzado.
Confinamiento del suelo	Tridimensional (3D)	El confinamiento incrementa el módulo de rigidez y la resistencia al corte aparente del suelo, incluso bajo condiciones de saturación.
Comportamiento bajo carga sísmica	Reducción significativa de desplazamientos laterales	La rigidez del sistema suelo–geocelda limita deformaciones y mejora la respuesta dinámica del talud frente a aceleraciones sísmicas.
Redistribución de esfuerzos	Eficiente	La estructura celular actúa como un panel reforzado continuo, redistribuyendo las cargas sísmicas hacia zonas más estables del talud.
Interacción suelo–refuerzo	Alta eficiencia	La confinación dentro de las celdas optimiza la transferencia de esfuerzos y reduce la concentración de tensiones en la superficie crítica.
Desempeño dinámico global	Superior	El sistema presenta un comportamiento más estable que los refuerzos planares, con mejor control de deformaciones post-sísmicas.
Implicancia de diseño	Solución óptima en condición sísmica	Se recomienda su aplicación en taludes con alta demanda sísmica y suelos granulares por su mayor robustez estructural.

Nota. análisis dinámico conforme a la Norma CE.020

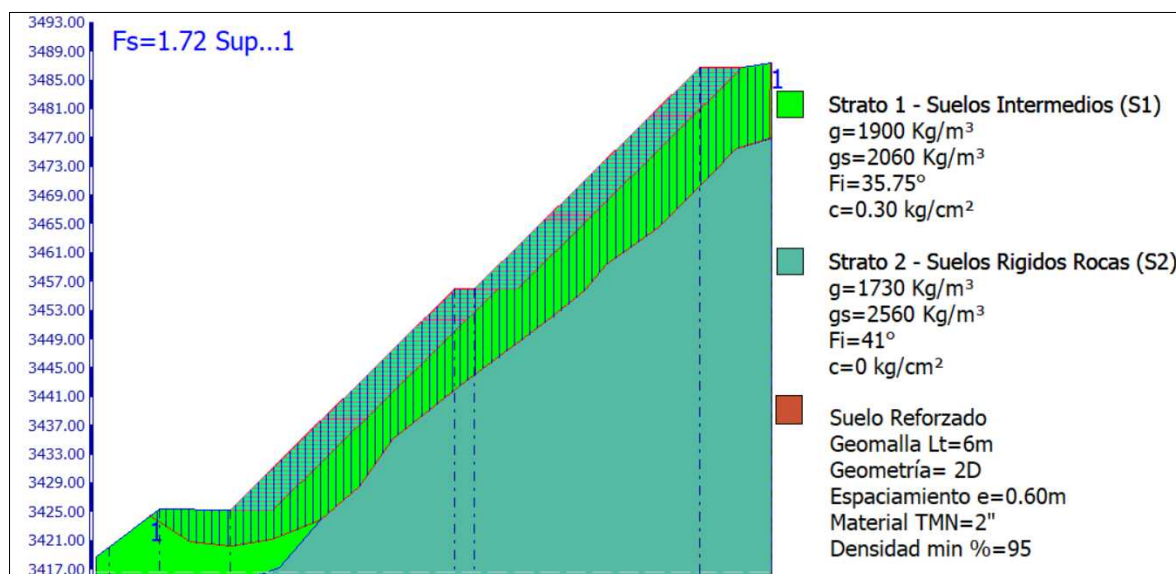
5.4. Análisis de estabilidad del talud con geomalla coextruida

5.4.1. Análisis estático de estabilidad del talud

El análisis de estabilidad estática para la alternativa con Geomalla Coextruida se realizó mediante modelamiento numérico en el software *Geostru Slope*. El proceso consistió en definir la geometría del talud a partir del levantamiento topográfico e incorporar los estratos del suelo con sus parámetros geotécnicos característicos obtenidos en laboratorio. La Geomalla Coextruida se implementó en el modelo como un elemento de refuerzo planar bidimensional, asignándole propiedades de resistencia a la tracción a largo plazo según las especificaciones del fabricante. Se configuró la interacción suelo-refuerzo, y el análisis se ejecutó mediante el método de equilibrio límite de Janbu, seleccionado por su idoneidad para superficies de falla no circulares, con el objetivo de cuantificar la mejora en la estabilidad proporcionada por este sistema de refuerzo.

figura 27.

Análisis de estabilidad de talud con geomalla Coextruida.



Nota. La Geomalla Coextruida también logra estabilizar el talud, alcanzando un F.S. estático de 1.72. Su mecanismo de refuerzo es bidimensional (2D), aportando resistencia a la tracción que incrementa el momento resistencia.

5.4.2. Análisis Técnicos del Modelamiento de Geomalla

Tabla 24.

Interpretación del modelamiento estático con Geomalla coextruida

Ítem	Parámetro evaluado	Valor / Resultado	Interpretación técnica	Implicancia en la estabilidad
2	Peso unitario (γ)	19.00 kN/m ³	Valor típico para gravas arenosas	Incrementa esfuerzos normales en la superficie de falla
3	Ángulo de fricción (ϕ')	35.75°	Fricción moderada–alta	Condición desfavorable sin refuerzo
4	Cohesión (c')	0.30 kg/cm ² (30 kPa)	Cohesión baja	Aporte secundario a la estabilidad
5	Tipo de refuerzo	Geomalla biaxial	Refuerzo por tracción	Incrementa el momento resistente
6	Tipo de falla crítica	Traslacional / planar profunda	Falla intercepta capas de geomalla	El refuerzo actúa directamente sobre la superficie crítica
7	Factor de seguridad (FS)	1.72	Superior al mínimo normativo	Talud estable en condición estática
8	Comparación con estado natural	FS natural = 1.26	Incremento significativo de estabilidad	Mejora = +137 %
9	Superficie crítica	Desplazada hacia atrás y mayor profundidad	Efecto del refuerzo traccional	Reducción del riesgo de deslizamiento
10	Cumplimiento normativo	CE.020 (FS \geq 1.50)	Cumple en condición estática	Apto para condición de diseño base
12	Evaluación global	Talud estable con refuerzo	FS adecuado	Geomalla efectiva para falla profunda

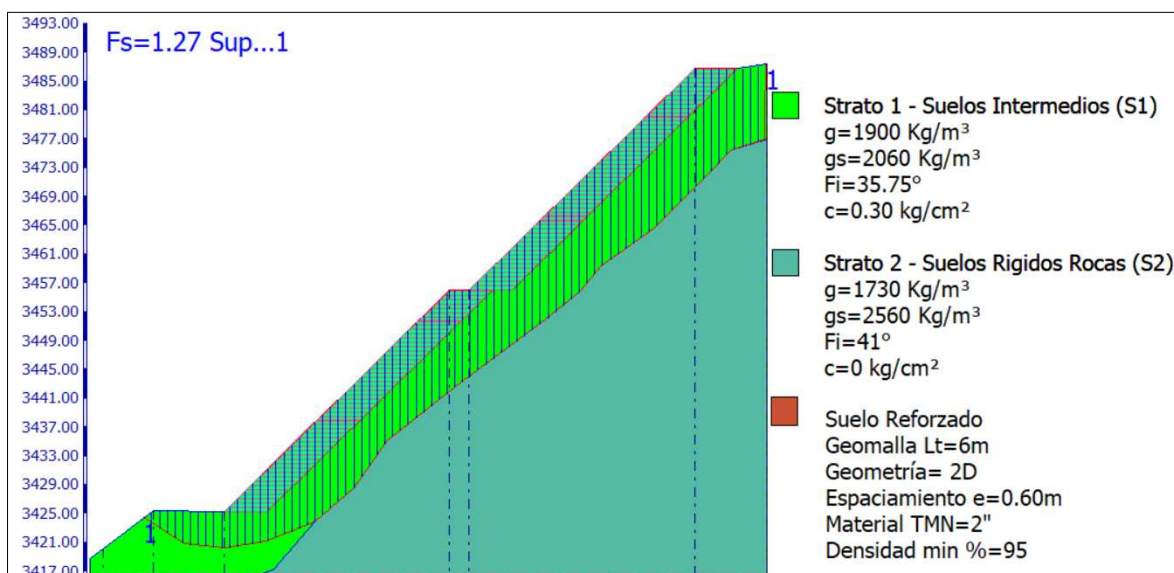
Nota. Las verificaciones de diseño detallado (pullout, rotura y factores de reducción) no se incluyen. El modelamiento muestra que la geomalla incrementa el FS de 1.26 a 1.72, cumpliendo el valor mínimo exigido por la CE.020 (FS \geq 1.50) en condición estática, confirmando la estabilidad global del talud.

5.4.3. Análisis Dinámico de Estabilización del Talud - Geomalla Coextruida

El análisis dinámico del talud reforzado con geomalla Coextruida se realizó considerando la acción sísmica mediante un enfoque pseudoestático, de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Norma Técnica E.050 y la Norma CE.020 – Estabilización de Suelos y Taludes. Para ello, se incorporaron los coeficientes sísmicos horizontales y verticales correspondientes a la zona de estudio, representativa del comportamiento sísmico del sector Chuquicahuana.

Figura 28.

Análisis dinámico con Geomalla coextruida



Nota. En condición dinámica, la geomalla alcanza un F.S. de 1.27, apenas por encima del límite normativo. Esto sugiere un menor margen de seguridad frente a eventos sísmicos. El modelo indica una reducción en la adherencia suelo-malla bajo sismo y la ausencia de confinamiento 3D, lo que podría traducirse en mayores deformaciones post-sísmicas comparadas con la solución con geocelda GW20V.

5.4.4. Análisis técnicos del modelamiento de geomalla coextruida

Tabla 25.

Interpretación de modelamiento dinámico - Geomalla Coextruida

Aspecto evaluado	Resultado del análisis dinámico	Interpretación técnica
Factor de Seguridad sísmico	FS = 1.27 (> 1.25 CE.020)	El valor obtenido cumple con el mínimo exigido por la Norma CE.020 para condición sísmica, indicando estabilidad global aceptable del talud reforzado.
Tipo de refuerzo	Geomalla Coextruida (planar)	Refuerzo eficaz en estático y en dinámica
Tipo de falla	Traslacional o planar profunda	El volumen movilizado supera la capacidad resistente del refuerzo
Comportamiento bajo sismo	Reducción de adherencia suelo–malla	Disminuye la transferencia de carga y aumenta la deformación
Confinamiento	Bidimensional (2D)	No existe confinamiento tridimensional del suelo
Capacidad resistente	Suficiente frente a demanda sísmica	El refuerzo genera un momento resistente suficiente para contrarrestar las fuerzas inerciales inducidas por el sismo. Se recomienda evaluar el uso de un sistema complementario (geomalla + geocelda) para mejorar el confinamiento y reducir deformaciones post-sísmicas
Implicancia de diseño	Requiere rediseño o refuerzo combinado	

Nota. El FS dinámico obtenido (1.27) si cumple el valor mínimo $FS \geq 1.25$ exigido por la CE.020, Fuente: Elaboración propia.

5.5. Análisis económico comparativo entre alternativas de estabilización

5.5.1. Análisis económico

Para complementar el análisis técnico desarrollado en los apartados previos, en el presente ítem se realiza la evaluación económica comparativa de las dos alternativas de geosintéticos propuestas para la estabilización del talud comprendido entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 de la carretera Red Departamental CU-117, en el sector Chuquicahuana. Esta evaluación constituye un paso fundamental para determinar la viabilidad económica del diseño, ya que permite identificar qué solución proporciona un mejor equilibrio entre costo y rendimiento estructural, considerando que ambas fueron previamente modeladas y verificadas mediante los análisis de estabilidad correspondientes.

Con este propósito, se elaboraron los presupuestos completos para cada alternativa (Geocelda GW20V y Geomalla Coextruida), los cuales incluyen costos directos, insumos, mano de obra, equipos, gastos generales, utilidad e impuestos. A partir de los Presupuestos Resultantes, se comparan los costos totales de cada sistema con el fin de establecer cuál representa la opción económicamente más eficiente para la ejecución del proyecto. La información obtenida permitirá sustentar la elección final del geosintético, integrando criterios técnicos, constructivos y económicos en una decisión justificada.

5.5.2. Descripción del presupuesto – geocelda GW20V

El presupuesto para la estabilidad de talud con - Geocelda GW20V tiene como objetivo exponer el costo directo de la solución y proyectar el presupuesto total para la estabilización del talud en el sector Chuquicahuana, utilizando el sistema de Geocelda GW20V. El presupuesto se ha estructurado en siete partidas principales, con un Costo Directo total que asciende a S/ 2,543,290.02.

5.5.3. Costo directo (CD)

El Costo Directo (CD) representa el total de los gastos incurridos directamente en la ejecución de las obras, incluyendo mano de obra, materiales, equipos y subcontratos. El siguiente cuadro muestra la distribución por ítem:

Tabla 26.

Costo directo por sub – presupuesto Geocelda GW20V

Ítem	Descripción	Sub Total (s/.)	% del CD
01.01	Trabajos preliminares	36,117.60	1.42%
01.02	Movimiento de Tierra	229,452.15	9.02%
01.03	Obras de arte e instalación de Geosintético	1,778,266.93	69.92%
01.04	Transporte	314,743.34	12.38%
01.05	Señalización y Seguridad Vial	26,289.37	1.03%
01.06	Acondicionamiento de Botaderos	60,471.24	2.38%
01.07	Protección Ambiental	97,949.39	3.85%
TOTAL	Costo Directo	2,543,290.02	100.00%

Nota. Se destaca que la partida de Obras de arte e instalación de Geosintéticos (Ítem 01.03) es la de mayor incidencia, representando más de la mitad (69.92%) del costo total.

5.5.4. Costo específico de la geocelda GW20V

El componente principal para la estabilización es el suministro de la Geocelda GW20V.

Tabla 27.

Costo específico de la Geocelda GW20V

Recurso	Unidad	Cantidad	Costo Unitario s/.	Costo Total S/.
Geocelda GW20V	M2	41,346.29	26.43	1,092,782.44

Nota. La cantidad total de geosintético requerida para la estabilización del talud en el tramo de 100 metros (progresivas 161+956 a 162+056) es de 41,316.59 m² y el costo del suministro asciende a S/ 1,091,997.47.

5.5.5. Costo indirecto (gastos generales)

Los Costos Indirectos del proyecto se aplican sobre el Costo Directo e incluyen los gastos operativos y administrativos necesarios para la ejecución de la obra.

- Total, de gastos generales: S/ 286,770.12
- Porcentaje de Gastos Generales: 11.28% sobre el Costo Directo.

5.5.6. Resumen de costo

Considerando solo los datos proporcionados (Costo Directo y Gastos Generales), el costo sub total de la obra.

Tabla 28.

Resumen de costo – total Geocelda GW20V

Concepto	Monto (s/)
Costo Directo (CD)	2,543,290.02
(+) Gastos Generales (GG)	286,770.12
Sub Total (CD + GG)	2,830,060.14

Nota. Sub total de estabilización con Geocelda GW20V, fuera de impuestos y utilidades

5.5.7. Descripción del presupuesto – geomalla coextruida

El presupuesto para la Estabilidad con Geomalla Biaxial Coextruida en el sector de Chuquicahuana se ha estructurado considerando los costos directos de la ejecución de la obra y los costos indirectos (gastos generales).

5.5.8. Costo directo (CD)

El Costo Directo (CD) representa la suma total de los costos de la mano de obra, materiales y equipo requeridos para ejecutar todas las partidas del proyecto.

- Costo directo total del proyecto: s/. 2,393,203.76
- Este costo incluye partidas principales como Trabajos Preliminares, Movimiento de Tierras, Obras de Arte e Instalación de Geosintético, Transporte, Acondicionamiento de Botaderos, Señalización, y Protección Ambiental.

Tabla 29.*Costo directo por sub – presupuesto Geomalla Coextruida*

Ítem	Descripción	Sub Total (s/.)	% del CD
01.01	Trabajos preliminares	37,237.62	1.56%
01.02	Movimiento de Tierra	233,476.09	9.75%
01.03	Obras de arte e instalación de Geosintético	1,624,466.63	67.88%
01.04	Transporte	316,830.80	13.24%
01.05	Señalización y Seguridad Vial	26,273.07	1.10%
01.06	Acondicionamiento de Botaderos	59,081.09	2.47%
01.07	Protección Ambiental	95,838.46	4.00%
TOTAL	Costo Directo	2,393,203.76	100.00%

Nota. Se destaca que la partida de Obras de arte e instalación de Geosintéticos (Ítem 01.03) es la de mayor incidencia, representando más de la mitad (67.88%) del costo total.

5.5.9. Costo específico de la geomalla coextruida

El componente principal para la estabilización es el suministro de la Geomalla Biaxial Coextruida.

Tabla 30.*Costo específico de la Geomalla Coextruida*

Recurso	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Geomalla Biaxial Coextruida	M2	41,316.59	6.09	251,798.91

Nota. La cantidad total de geosintético requerida para la estabilización del talud entre las progresivas 161+956 a 162+056) es de 41,316.59 m2, El costo del suministro del material

geosintético asciende a S/ 251,798.91, siendo esta la inversión directa en el refuerzo estructural.

5.5.10. Costos indirectos (gastos generales)

Los Costos Indirectos del proyecto se aplican sobre el Costo Directo e incluyen los gastos operativos y administrativos necesarios para la ejecución de la obra.

- Total, de gastos generales: S/ 302,081.16
- Porcentaje de Gastos Generales: 12.62% sobre el Costo Directo.

5.5.11. Resumen de costo

Considerando solo los datos proporcionados (Costo Directo y Gastos Generales), el costo sub total de la obra antes de la utilidad e IGV (si estos no están incluidos en los archivos) es:

Tabla 31.

Resumen de costo – total Geomalla Coextruida

Concepto	Monto (s/)
Costo Directo (CD)	2,393,203.76
(+) Gastos Generales (GG)	302,081.16
Sub Total (CD + GG)	2,695,284.92

Nota. Sub total de estabilización con Geomalla Coextruida, fuera de impuestos y utilidades

5.5.12. Comparación económica entre geomalla y geocelda GW20V

Para responder al objetivo específico de comparar la economía de los geosintéticos propuestos para la estabilización del talud entre las progresivas km 161+956 al km 162+056 en Chuquichuana, se ha consolidado un análisis de costos detallado. Utilizando los datos de presupuestos generados por el software Delphin Express para ambas soluciones, la tabla 26 presenta la estructura de costos total, discriminando el Costo Directo y los Gastos Generales. Esta comparación es esencial para la toma de decisiones, ya que permite determinar si la Geomalla Coextruida o la Geocelda GW20V ofrece la solución más costo-

efectiva para la carretera CU-117, basándose en una métrica financiera robusta y directamente aplicable al proyecto.

A continuación, se presenta el análisis comparativo de costos correspondiente a las alternativas de estabilización con Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V, desarrollado en el marco del objetivo específico orientado a determinar cuál solución resulta más económica para el tramo crítico entre las progresivas km 161+956 al km 162+056. Para ambas alternativas se evaluaron el costo directo, los gastos generales y el presupuesto total. Los resultados muestran que la Geomalla Coextruida registra un costo directo de S/. 2,393,203.76, mientras que la Geocelda GW20V alcanza S/. 2,543,290.02, evidenciando una diferencia de S/. 150,086.26 a favor de la primera. Asimismo, los gastos generales representan el 12.62 % del costo directo para la geomalla y el 11.28 % para la geocelda; sin embargo, el monto resultante continúa siendo mayor en la segunda alternativa. En suma, el presupuesto total asciende a S/. 2,695,284.92 para la Geomalla Coextruida y S/. 2,830,060.14 para la Geocelda GW20V, lo que confirma que, desde el punto de vista económico, la geomalla representa la opción más conveniente en el tramo evaluado, como se detalla en la Tabla 22.

Tabla 32.

Comparativo entre Geomalla Coextruida y Geocelda GW20V

Concepto	Unidad	Geomalla Coextruida	Geocelda GW20V	Diferencia (s/.)	Diferencia Porcentual
Costo directo (CD)	S/.	2,393,203.76	2,543,290.02	150,086.26	6.27%
Gastos Generales (GG)	% de CD	12.62%	11.28%	1.34 p.p.	
Monto GG	S/.	302,081.16	286,770.12	15,311.04	5.07%
Presupuesto Total	S/.	2,695,284.92	2,830,060.14	134,775.22	5.00%

Nota. El análisis evidencia que la solución con Geocelda GW20V presenta un costo directo 6.27% mayor y un presupuesto total 5.00% superior en comparación con la Geomalla

Coextruida. Los cálculos se basan en metrados reales del tramo estudiado, modelados y cuantificados mediante Delphin Express.

5.6. Discusiones

La presente investigación permitió validar los hallazgos reportados en la literatura internacional y nacional, los cuales destacan la eficacia individual de geoceldas y geomallas para la estabilización de taludes. No obstante, este estudio supera una brecha crítica identificada en el estado técnica: la ausencia de análisis comparativos técnico-económicos integrales, desarrollados específicamente para suelos granulares bajo los criterios de la normativa peruana CE.020. Los resultados obtenidos no solo confirman que ambos geosintéticos son capaces de estabilizar el talud crítico en Chuquicahuana, sino que también proporcionan un marco decisional claro y cuantitativo: la Geocelda GW20V representa el óptimo técnico al ofrecer los mayores factores de seguridad, mientras que la Geomalla Coextruida constituye el óptimo económico, al presentar el menor costo total. Esta dualidad ofrece a los proyectistas una base sólida para seleccionar la solución más adecuada según las prioridades específicas de cada proyecto (seguridad máxima vs. optimización presupuestaria).

Hipótesis General:

- **Discusión:** Los resultados conducen a una confirmación parcial de esta hipótesis. Desde una perspectiva puramente técnica, la Geocelda GW20V demostró un desempeño superior, alcanzando factores de seguridad más elevados tanto en condición estática (1.78 vs. 1.72) como dinámica (1.32 vs. 1.27). Este mejor comportamiento se atribuye directamente a su mecanismo de confinamiento celular tridimensional (3D), que incrementa la resistencia al corte aparente del suelo, redistribuye eficientemente los esfuerzos y proporciona una mayor rigidez estructural, especialmente bajo solicitaciones sísmicas. Sin embargo, el análisis

económico reveló que esta superioridad técnica tiene un costo: la solución con Geocelda GW20V resultó aproximadamente 5% más cara (S/ 134,775.22) que la alternativa con Geomalla Coextruida. Por lo tanto, mientras la Geocelda es más superior, no lo es en una evaluación económico-técnica integrada que priorice únicamente la minimización de costos. La elección final dependerá de si el proyecto prioriza el máximo margen de seguridad y desempeño dinámico (favoreciendo a la Geocelda) o la optimización del presupuesto con un cumplimiento normativo adecuado (favoreciendo a la Geomalla).

Hipótesis Específica (H.E.1):

- **Discusión:** Los resultados **confirman plenamente** esta hipótesis. La caracterización geotécnica reveló un suelo granular limoso (GM/GW-GM) con un ángulo de fricción interna moderado-alto ($\phi = 35.7^\circ$) pero una cohesión muy baja ($c = 0.30 \text{ kg/cm}^2$). Esta combinación, sumada a la geometría empinada del talud, resultó insuficiente para garantizar la estabilidad. Los factores de seguridad en estado natural (F.S. estático = 1.26; F.S. dinámico = 0.90) se sitúan muy por debajo de los mínimos normativos, confirmando la condición de inestabilidad y la necesidad imperativa de un sistema de refuerzo.

Hipótesis Específica (H.E.2):

- **Discusión:** Los resultados confirman cuantitativamente esta hipótesis. Los valores calculados (1.26 y 0.90) validan de manera objetiva el alto riesgo de deslizamiento, particularmente bajo condiciones sísmicas o de saturación. Este hallazgo justifica técnicamente las intervenciones de emergencia reportadas en el sector y subraya la urgencia de una solución de estabilización permanente.

Hipótesis Específica (H.E.3):

- **Discusión:** Los resultados confirman plenamente esta hipótesis. La implementación de la Geocelda GW20V elevó el F.S. estático a 1.78 y el dinámico a 1.32, superando con holgura los umbrales de la norma CE.020. Esto evidencia la alta efectividad del confinamiento 3D para mejorar la estabilidad global en el tipo de suelo y geometría analizados.

Hipótesis Específica (H.E.4):

- **Discusión:** Los resultados también confirman plenamente esta hipótesis. La Geomalla Coextruida logró factores de seguridad de 1.72 (estático) y 1.27 (dinámico), cumpliendo con los criterios normativos. No obstante, es notable que el margen de seguridad en condición dinámica (1.27) es mucho más ajustado que el ofrecido por la Geocelda (1.32), lo que sugiere una menor capacidad para acomodar incertidumbres o eventos sísmicos más severos sin riesgo de alcanzar el límite de estabilidad.

Hipótesis Específica (H.E.5):

- **Discusión:** Los resultados confirman plenamente esta hipótesis. El análisis presupuestal detallado reveló una diferencia total de S/ 134,775.22, lo que representa un 5.00% de incremento en el costo total para la solución con Geocelda GW20V. Esta diferencia, principalmente atribuible al mayor costo unitario del material geosintético tridimensional, es estadística y prácticamente significativa, influyendo directamente en la viabilidad financiera del proyecto.

VI. Conclusiones

1. Se verificó que las propiedades mecánicas del talud natural corresponden a un suelo granular limoso (clasificación SUCS GM/GW-GM), con un comportamiento predominantemente friccional (ϕ promedio = 35.7°), cohesión baja (c promedio = 0.30 kg/cm^2) y un peso unitario de 1.90 g/cm^3 . Estas propiedades son insuficientes para garantizar la estabilidad del talud en su geometría actual, confirmando plenamente la **(H.E.1)**.
2. El análisis de estabilidad del talud en su condición natural arrojó un Factor de Seguridad (F.S.) estático de 1.26 y un F.S. dinámico de 0.90. Ambos valores se encuentran muy por debajo de los mínimos exigidos por la norma CE.020 (1.50 y 1.25, respectivamente), lo que valida la **(H.E.2)** y justifica técnicamente la necesidad imperante de una intervención de estabilización.
3. La estabilización con Geocelda GW20V demostró un óptimo desempeño técnico, incrementando el F.S. a 1.78 (estático) y 1.32 (dinámico). Estos resultados superan los requisitos normativos y evidencian la eficacia de su mecanismo de confinamiento celular tridimensional (3D) para mejorar la resistencia al corte aparente y la rigidez del macizo de suelo, confirmando así la **(H.E.3)**.
4. La estabilización con Geomalla Coextruida también resultó efectiva, logrando un F.S. de 1.72 (estático) y 1.27 (dinámico), cumpliendo con los límites de la norma CE.020. Sin embargo, su mecanismo de refuerzo bidimensional (2D) ofrece un margen de seguridad, particularmente en condición dinámica, más reducido que el de la geocelda, confirmando la **(H.E.4)**.
5. Existe una diferencia económica significativa entre ambas alternativas. La solución con Geomalla Coextruida presenta un costo total (S/ 2,695,284.92) aproximadamente 5.0% menor que la de Geocelda GW20V (S/ 2,830,060.14), con

una diferencia absoluta de S/ 134,775.22. Este hallazgo valida la **(H.E.5)** y posiciona a la geomalla como la alternativa de menor costo.

6. La Hipótesis General se confirma parcialmente. Si bien la Geocelda GW20V es técnicamente superior al proveer los mayores factores de seguridad y un mecanismo de refuerzo más robusto, no lo es en una evaluación económico-técnica integral donde el costo es un factor decisivo. Por lo tanto, la elección final entre ambos geosintéticos debe basarse en la prioridad del proyecto:

Geocelda GW20V: Para proyectos que prioricen el máximo desempeño estructural, el mayor margen de seguridad (especialmente sísmico) y la minimización de deformaciones a largo plazo.

Geomalla Coextruida: Para proyectos que busquen una solución efectiva y normativamente conforme, con la optimización del costo inicial como criterio principal. La Tabla 32 proporciona el marco cuantitativo para esta decisión.

VII. Recomendaciones

1. **Análisis Hidromecánico Acoplado:** Se recomienda realizar un análisis avanzado que modele explícitamente la infiltración de lluvias y el aumento de presión de poros a lo largo del tiempo (ej. con PLAXIS o GEO-SLOPE), para cuantificar con mayor precisión la reducción del F.S. en temporada húmeda y validar la suficiencia de la solución elegida bajo las condiciones más críticas.
2. **Diseño de Sistemas de Drenaje:** Es imperativo complementar el diseño con un sistema de drenaje integral y detallado. Esto debe incluir el cálculo hidráulico de cunetas de coronación revestidas, la especificación de drenes subsuperficiales (zanjas drenantes con geocompuesto) colocados estratégicamente, y el uso de geotextil filtrante entre el suelo y el geosintético para prevenir colmatación y garantizar la durabilidad del refuerzo.
3. **Validación con Datos Empíricos:** Para reducir la incertidumbre del modelamiento numérico, se recomienda contrastar los resultados con datos de desempeño de proyectos similares en la región o, idealmente, realizar ensayos de laboratorio (corte directo de gran escala o modelos físicos) que caractericen la interacción real suelo-geosintético bajo las condiciones locales.
4. **Especificaciones Técnicas y Control de Calidad Constructivo:** Se debe desarrollar un manual de procedimientos constructivos específico para la alternativa seleccionada, detallando secuencia de instalación, método de colocación y compactación del relleno, así como un plan de control de calidad con ensayos en obra (densidad, integridad de uniones) para asegurar la correcta ejecución.
5. **Plan de Monitoreo y Mantenimiento a Largo Plazo:** Como parte del proyecto, se recomienda implementar un plan de monitoreo geotécnico que incluya la instalación de instrumentación (piezómetros, inclinómetros) en la sección crítica, con definición

de frecuencias de lectura y valores umbral de alerta. Asimismo, establecer un protocolo de mantenimiento periódico para limpieza de drenes e inspección visual del refuerzo, garantizando la seguridad y funcionalidad de la obra durante su vida útil.

6. Las futuras investigaciones deben orientarse a superar las limitaciones de este estudio, enfocándose en evaluar el comportamiento a largo plazo y la durabilidad de ambos geosintéticos bajo condiciones reales de vida útil, ciclos hidrológicos y esfuerzos repetidos; desarrollar modelación numérica avanzada (ej. Elementos Finitos 3D, DEM) y su validación experimental mediante ensayos físicos a escala o prototipos instrumentados en campo, para caracterizar con mayor precisión la interacción suelo-refuerzo; y realizar análisis de ciclo de vida y costo total de propiedad, integrando los impactos ambientales y los costos de mantenimiento a largo plazo, para proporcionar una métrica integral de sostenibilidad y eficiencia económica que trascienda el costo inicial de construcción.

VIII. Referencias

- [MTC], M. d. (2018). *Manual de Carreteras DG-2018*. Lima.
- Abramson. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: JOHN WILEY & SONG, INC.
- Ballester, F., Castro, D., & Gil, M. (2000). Definición, función y clasificación de los geotextiles. *Arte y Cemento*, 122-130. Obtenido de Universidad de Cantabria: <https://www.giteco.unican.es/pdf/publicaciones/AYC30-X-2000.pdf>
- Bell, J. M. (1968). General Slope Stability Analysis. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1253-1270. doi:<https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001196>
- Bishop, A. W. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Geotechnique*, 7-17. doi:<https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7>
- Braja M., D. (2008). *Advanced Soil Mechanics* (3ra ed.). New York: Taylor & Francis.
- Braja M., D. (2011). *Geotechnical Engineering Handbook*. Florida: J. Ross Publishing.
- Braja M., D. (2011). *Principles of Foundation Engineering* (7ma ed.). Boston: Cengage Learning.
- Braja M., D. (2013). *Fundamentals of Geotechnical Engineering* (4ta ed ed.). New York: Cengage Learning S.A.
- Braja M., D., & Sobhan, K. (2018). *Principles of Geotechnical Engineering* (9na ed.). Boston: Cengage Learning.
- Cabrera Ubillus, C. B., & Falcon Hurtado, I. F. (2019). *Diseño de un muro de suelo reforzado por problemas de inestabilidad de taludes en el tramo km 163+960 al km 164+024 IIRSA sur tramo 2 - Cusco, 2019*. [Tesis de ingeniería civil, Universidad Cesar Vallejo]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/41318>
- Carrera Rojas, M. (2022). *Análisis Comparativo de la Influencia del Sistema Geoceldas Step con la Aplicación de Métodos Bishop, Janbú en los Parámetros de la Estabilización*

- de Taludes en la Represa Gallito Ciego – Cajamarca, 2022*. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Privada del Norte]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/11537/30143>
- De Matteis, Á. F. (2003). Estabilidad de taludes. *Geología y Geotecnia*, 5.
- Fellenius, W. (1936). Calculation of stability of earth dams. *Transactions of the 2nd Congress on Large Dams* (pág. 445). Washington, D.C.: Actas del Congreso (Washington, 1936).
- Flores Esteban, S. (2023). *Evaluación del Empleo de las Geoceldas para la estabilización de Taludes*. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Peruana lo Andes]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12848/5707>
- Geosistemas PAVCO SA. (2009). *Manual de diseño con geosintéticos*. Bogota: Zetta Comunicadores S.A.
- Gobierno Regional Cusco. (2023). *Plan de contingencia regional ante lluvias intensas 2022–2023*. CUSCO.
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2004). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Gutierrez Lope, W., & Sabino Rojas, E. (2022). *Erosividad de la lluvia en el Perú para el periodo 2000-2020*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú –SENAMHI.
- Hernández Chaverra, A., & Tamayo Ruiz, Y. (2019). *Análisis de estabilidad del talud y obras de contención necesarias para el diseño y construcción de una vía de orden secundario en el municipio De Dabeiba – Antioquia*. [Tesis de ingeniería civil, Universidad Cooperativa de Colombia]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12494/10699>

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación*. México D.F.: Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- INDECI. (2023). *Compendio estadístico del INDECI*. Lima: Moreno De Jacinto E.I.R.L.
- Janbu, N. (1973). Slope Stability Computations. En N. Janbu, *Slope Stability Computations* (págs. 47-86). New York: John Wiley & Sons.
- Jimbo Yépez, R., & Mesa Lavista, M. (2022). Modelación Computacional Para la Estabilización de un Terraplén Reforzado con Geomallas. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 19-32.
doi:<https://doi.org/10.46296/ycv6i11edespsep.0221>
- John Soto, J. (2011). *Protección y estabilización de taludes para evitar deslizamientos*. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Austral de Chile]. Obtenido de Universidad Austral de Chile:
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2011/bmfcij.65p/doc/bmfcij.65p.pdf>.
- Kalos, M. H., & Whitlock, P. A. (2008). *Monte Carlo Methods* (2da ed ed.). WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Marín, B., Oyola, J., Ordoñez, J., & Aguirre, F. (2020). Aplicación de programas analíticos e informáticos sobre estabilización de taludes en el cerro pata grande del cantón Piñas. *Conference Proceeding UTMACH 2020*, 15-25.
- Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Géotechnique*, 79-93.
- Park, C., & Sayers, P. (2025). Multi-channel analysis of surface waves (MASW) method. *The PWI Journal*, 18-22.
- Pineda Ruiz, R. P. (2019). Evaluación geológica, geomecánica y consideraciones para el prediseño de la estabilidad del talud del Santuario Blanca Estrella del Mar en el cerro de Olón, Santa Elena-Ecuador. [Tesis de ingeniería geológica, Escuela Superior

- Politecnica del Litoral]. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54879>
- Porras Zamora, J. A. (2021). *La estabilidad de talud en la vía Moyaccasa – Pulcay con Geoceldas como alternativa de estabilización distrito Huaccana, Chincheros, Apurímac 2021*. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/70208>
- Presto GeoSystems. (25 de 05 de 2020). *GeoSystems*. Obtenido de GeoSystems: <https://www.prestogeo.com/>
- Quispe Astete, E. (2020). *Análisis de las Condiciones de Estabilidad Física para Sistemas de Cobertura con Geosintético en el Cierre de Minas*. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.14076/21735>
- Rosales Pillco, W. (2018). *Análisis de la variabilidad de costos unitarios en los métodos de estabilización de talud del tramo km 244+300 – km 244+500 de la carretera interoceánica, distrito de Camanti, provincia de Quispicanchi - Cusco*. [Tesis de ingeniería civil, Universidad Alas Peruanas]. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12990/3053>
- Stein, S., & Wysession, M. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*. Malden, MA: Blackwell Publishing.
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. España: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- The Guardian. (10 de 08 de 2018). *Support the Guardian*. Obtenido de <https://www.theguardian.com/world/2018/aug/10/campers-take-shelter-in-schools-after-floods-hit-france>

- Torres Peña, M. (2021). *Evaluación experimental del efecto de disipación de esfuerzos producido por geoceldas sobre suelos blandos*. [Tesis de ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia]. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80850>
- Valiente Sanz, R., Sobrecases Martí, S., & Diaz Orrego, A. (2016). Estabilidad de taludes: Conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *Revista Civilizate*, 50-70. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/76781/taludes.pdf>
- Vergara Flores, R. A. (2018). *Estabilización de talud por tres Métodos: Gaviones, Geomalla y Muro de Contención en el Centro Poblado San Juanito Alto Distrito de Guadalupe-Viru- La Libertad*. [Tesis de ingeniería civil, Universidad San Pedro]. Obtenido de <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/7988>
- Vilchez M., M. (2015). *Zonas Críticas por Peligros Geológicos en la Region Cusco*. Cusco: Publicaciones Cusco.
- Villalba Sánchez, N. (2016). *Topografía Aplicada*. Lima: Macro EIRL.