Universidad Católica de Santa María

Facultad de Arquitectura e Ingenierías Civil y del Ambiente

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

Influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026

Tesis presentada por:

Andia Gutierrez, Pedro Paul

ORCID: 0009-0002-3376-8633

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesora:

Dra. García Godos Peñaloza, Luz Matilde

ORCID: 0000-0003-0591-2191

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA CIVIL

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 22 de Septiembre del 2026

Dictamen: 014268-C-EPIC-2026

Visto el borrador del expediente 014268, presentado por:

2018150031 - ANDIA GUTIERREZ PEDRO PAUL

Titulado:

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD GEOTÉCNICA EN LA ESTABILIDAD BIDIMENSIONAL ESTÁTICA Y PSEUDOESTÁTICA DE LOS TALUDES DEL BARRIO LA RECOLETA, RÍO CHILI, AREQUIPA, 2026

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Titulo Profesional/Titulo de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO CIVIL

29439333 - TICONA BALDARRAGO AGUSTO ISRRAEL
DICTAMINADOR

46309156 - MONTOYA VILLANUEVA FILIBERTO RODY
DICTAMINADOR

46890195 - DE LA CRUZ MENDOZA FERNANDO ARON
DICTAMINADOR

INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD GEOTÉCNICA EN LA ESTABILIDAD BIDIMENSIONAL ESTÁTICA Y PSEUDOESTÁTICA DE LOS TALUDES DEL BARRIO LA RECOLETA, RÍO CHILI, AREQUIPA, 2026

INFORME DE ORIGINALIDAD

18%	16%	9%	7%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Nacional de Ingenieria Trabajo del estudiante	1%
3	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.unach.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.udh.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	repository.unad.edu.co Fuente de Internet	<1%
9	Ticona Fernandez, Abdul. "Evaluacion geotecnica de la estabilidad del talud en la zona de Chacalaya - Ilave", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru), 2025 Publicación	<1%
10	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	<1%
11	qdoc.tips Fuente de Internet	<1%
12	Submitted to UTEC Universidad de Ingeniería & Tecnología (NO TOCAR) Trabajo del estudiante	<1%
13	Submitted to Universidad Tecnologica del Peru Trabajo del estudiante	<1%
14	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	

DEDICATORIA

A Dios, por darme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, Ana y Pedro, por su amor, apoyo incondicional y sacrificio constante. Gracias a ellos tuve la oportunidad de estudiar y seguir adelante en mi carrera profesional. Su esfuerzo, confianza y consejos han sido fundamentales para alcanzar esta meta.

A mi familia, por acompañarme en este proceso y motivarme a no rendirme frente a las dificultades.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento a la Universidad Católica de Santa María, especialmente a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por brindarme la formación académica y profesional necesaria para el desarrollo de esta investigación.

A mi asesora, Dra. García Godos Peñaloza, Luz Matilde, por su orientación, tiempo y apoyo durante el proceso de elaboración de la presente tesis.

A los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por los conocimientos impartidos a lo largo de mi formación universitaria, los cuales contribuyeron al desarrollo de este trabajo de investigación.

Asimismo, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, me brindaron su apoyo, motivación y colaboración durante la realización de esta tesis.

RESUMEN

La investigación estudió la influencia de la variabilidad geotécnica sobre la estabilidad bidimensional de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, bajo condiciones estática y pseudoestática, 2026. La investigación siguió un enfoque cuantitativo, de tipo básico y nivel explicativo, con un diseño no experimental de corte transversal. La muestra estuvo constituida por tres secciones representativas del talud: cresta, zona media y pie. La caracterización geotécnica comprendió la excavación de nueve calicatas, la determinación de propiedades físicas, la clasificación SUCS y ensayos de permeabilidad y corte directo. La estabilidad fue evaluada con el software Slide V6.004, mediante la aplicación del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb y el método de equilibrio límite de Spencer. En condición estática, los factores de seguridad fueron de 1.393, 0.560 y 1.129, correspondientes a la cresta, zona media y pie, respectivamente. En condición pseudoestática, los factores de seguridad fueron de 1.145, 0.423 y 1.000. Se realizó un análisis determinístico de sensibilidad mediante la variación individual de los parámetros geotécnicos, complementado con una simulación Monte Carlo en ModelRisk de 10 000 realizaciones por escenario. Esta simulación permitió estudiar la distribución del factor de seguridad y cuantificar la sensibilidad estadística mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. En condición estática, el peso unitario presentó la mayor sensibilidad relativa en la cresta, mientras que el ángulo de fricción interna predominó en la zona media y el pie. En condición pseudoestática, la cresta presentó una sensibilidad distribuida entre las variables consideradas, mientras que en la zona media y el pie predominó el coeficiente sísmico horizontal, seguido principalmente por el ángulo de fricción interna. La zona media presentó factores de seguridad inferiores a 1.00 en el 100 % de las realizaciones de ambas condiciones, confirmándose como la sección más desfavorable dentro de los escenarios analizados. Se concluye que la variabilidad de los parámetros geotécnicos influye en el factor de seguridad y modifica las condiciones de estabilidad de las secciones evaluadas.

Palabras clave: variabilidad geotécnica, estabilidad de taludes, factor de seguridad.

ABSTRACT

This research evaluated the influence of geotechnical variability on the two-dimensional static and pseudo-static stability of the slopes located in La Recoleta neighborhood, Chili River, Arequipa, 2026. The study followed a quantitative approach, with a basic research type, an explanatory level, and a non-experimental cross-sectional design. The sample consisted of three representative sections of the slope: crest, middle zone, and slope toe. The geotechnical characterization included the excavation of nine test pits, the determination of physical properties, USCS classification, permeability tests, and direct shear tests. Stability was evaluated using Slide V6.004, applying the Mohr-Coulomb strength criterion and Spencer's limit equilibrium method. Under static conditions, safety factors of 1.393, 0.560, and 1.129 were obtained for the crest, middle zone, and slope toe, respectively. Under pseudo-static conditions, the corresponding safety factors were 1.145, 0.423, and 1.000. A deterministic sensitivity analysis was carried out by individually varying the geotechnical parameters and was complemented by a Monte Carlo simulation using ModelRisk with 10,000 realizations per scenario. This simulation made it possible to evaluate the safety factor distribution and quantify statistical sensitivity through rank correlation, standardized beta coefficients, and proportional contribution. Under static conditions, unit weight showed the highest relative sensitivity at the crest, whereas the internal friction angle predominated in the middle zone and at the slope toe. Under pseudo-static conditions, the crest showed distributed sensitivity among the variables considered, while the horizontal seismic coefficient predominated in the middle zone and at the slope toe, followed mainly by the internal friction angle. The middle zone presented safety factors below 1.00 in 100% of the realizations under both static and pseudo-static conditions, confirming it as the most unfavorable section within the analyzed scenarios. The results indicate that geotechnical variability influences the safety factor and modifies the stability conditions of the evaluated sections.

Keywords: geotechnical variability, slope stability, safety factor.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 3

1.1. Problemática de la investigación 3

1.2. Planteamiento del problema 4

1.2.1. Problema general 4

1.2.2. Problemas específicos 4

1.3. Justificación de la investigación 5

1.3.1. Justificación ambiental 5

1.3.2. Justificación social 5

1.3.3. Justificación económica 6

1.3.4. Justificación metodológica 6

1.3.5. Justificación teórica 7

1.3.6. Justificación tecnológica 7

1.4. Delimitación de la investigación 8

1.4.1. Delimitación espacial 8

1.4.2. Delimitación temporal 8

1.4.3. Delimitación temática 9

1.4.4. Delimitación metodológica 9

1.5. Objetivos de la investigación 10

1.5.1. Objetivo general 10

1.5.2. Objetivos específicos 10

1.6. Hipótesis 11

1.6.1. Hipótesis general 11
1.6.2. Hipótesis específicas 11
1.7. Variables y matriz de operacionalización 11
1.7.1. Variables de la investigación 12
1.7.2. Variable independiente 12
1.7.3. Variable dependiente 12
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO 14
2.1. Antecedentes de la investigación 14
2.1.1. Antecedentes internacionales 14
2.1.2. Antecedentes nacionales 17
2.1.3. Antecedentes regionales y locales 18
2.2. Estado del arte 19
2.2.1. Evolución del análisis de estabilidad de taludes 19
2.2.2. Evolución del estudio de la variabilidad geotécnica 22
2.2.3. Evolución del análisis bidimensional estático y pseudoestático 24
2.2.4. Tendencias actuales, limitaciones y controversias en la investigación 26
2.2.5. Métodos predominantes y limitaciones identificadas 27
2.2.6. Vacío del conocimiento 29
2.2.7. Matriz de síntesis del estado del arte 30
2.3. Marco teórico 35
2.3.1. Estabilidad de taludes 35
2.3.2. Resistencia al corte del suelo según Mohr-Coulomb 37
2.3.3. Teoría de esfuerzos efectivos 39
2.3.4. Cohesión efectiva (c') 40
2.3.5. Ángulo de fricción efectiva (φ') 41
2.3.6. Peso unitario del suelo 42
2.3.7. Presión de poros 43

2.3.8. Factor de seguridad (FS) 44
2.3.9. Métodos de equilibrio límite 44
2.3.10. Superficies de falla 45
2.3.11. Análisis pseudoestático 46
2.3.12. Coeficientes sísmicos 48
2.3.13. Selección del coeficiente pseudoestático 49
2.3.14. Variabilidad geotécnica 50
2.3.15. Parámetros estadísticos 51
2.3.16. Análisis de sensibilidad 53
2.3.17. Margen de seguridad 54
2.4. Marco legal 55
2.4.1. Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones 55
2.4.2. Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente 55
2.4.3. Ley N.° 29664 – Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD) 56
2.4.4. Norma ISO 14688-1:2017 56
2.4.5. Normas ASTM empleadas en la investigación 56
2.4.6. Publicaciones técnicas de INGEMMET 57
2.4.7. Norma Técnica CE.020: Estabilización de Suelos y Taludes 57
2.5. Definición de términos básicos 57
2.5.1. Talud 57
2.5.2. Estabilidad de taludes 57
2.5.3. Variabilidad geotécnica 58
2.5.4. Cohesión 58
2.5.5. Ángulo de fricción interna 58
2.5.6. Peso unitario 58

2.5.7. Factor de seguridad 59
2.5.8. Margen de seguridad 59
2.5.9. Análisis estático 59
2.5.10. Análisis pseudoestático 59
2.5.11. Coeficiente sísmico horizontal kh 59
2.5.12. Método de Spencer 60
2.5.13. Superficie de falla 60
2.5.14. Análisis de sensibilidad 60
2.5.15. Simulación Monte Carlo 60
2.5.16. Slide V6.004 60
2.5.17. ModelRisk 61
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA 62
3.1. Enfoque, tipo y nivel de investigación 62
3.2. Diseño de la investigación 63
3.2.1. Matriz de operacionalización de variables 66
3.2.2. Análisis de variables 67
3.2.3. Análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta paramétrica y criterios de contrastación de las hipótesis 69
3.3. Método de investigación 73
3.3.1. Área de estudio 74
3.3.2. Recolección de datos 77
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN 103
4.1. Caracterización de la variabilidad geotécnica de los taludes del barrio La Recoleta – río Chili, Arequipa 2026. 103
4.1.1. Distribución espacial de las calicatas 103
4.1.2. Características de las calicatas 105
4.1.3. Mapeo geotécnico de campo y perfiles esquemáticos del talud 107
4.1.4. Criterio de selección de muestras para los ensayos de laboratorio 112

4.1.5. Densidad máxima y mínima 114
4.1.6. Límite líquido de los suelos 115
4.1.7. Contenido de humedad 117
4.1.8. Clasificación método SUCS 119
4.1.9. Gravedad específica 124
4.1.10. Permeabilidad del suelo 125
4.1.11. Ensayo de corte directo y parámetros geotécnicos empleados en Slide 126
4.2. Análisis bidimensional estático de estabilidad 128
4.2.1. Estabilidad estática en la zona de cresta 129
4.2.2. Estabilidad estática en la zona media 131
4.2.3. Estabilidad estática en el pie del talud 132
4.2.4. Comparación de factores de seguridad en condición estática 134
4.3. Análisis bidimensional pseudoestático de estabilidad 135
4.3.1. Estabilidad pseudoestática en la zona de cresta 136
4.3.2. Estabilidad pseudoestática en la zona media 137
4.3.3. Estabilidad pseudoestática en el pie del talud 138
4.3.4. Comparación de factores de seguridad en condición pseudoestática 140
4.4. Comparación entre condición estática y pseudoestática 141
4.5. Análisis de sensibilidad 143
4.5.1. Análisis de sensibilidad en la zona de cresta 145
4.5.2. Análisis de sensibilidad en la zona media 147
4.5.3. Análisis de sensibilidad en el pie del talud 149
4.5.4. Resumen general del análisis de sensibilidad 151
4.5.5. Análisis integrado de la respuesta paramétrica y de la sensibilidad estadística de la respuesta simulada para la contrastación de las hipótesis específicas 4 y 5 153
4.6. Simulación Monte Carlo complementaria 163
4.6.1. Validación del modelo aproximado de respuesta 167

4.6.2. Simulación Monte Carlo en condición estática 170
4.6.3. Simulación Monte Carlo en condición pseudoestática 172
4.6.4. Comparación de los resultados simulados entre condición estática y pseudoestática 173
4.6.5. Interpretación general de la simulación Monte Carlo 174
4.7. Discusión de resultados 176
4.7.1. Contrastación integrada de las hipótesis de investigación 177
4.7.2. Variabilidad física y mecánica de las secciones representativas 180
4.7.3. Estabilidad bidimensional bajo condición estática 182
4.7.4. Estabilidad bidimensional bajo condición pseudoestática 183
4.7.5. Influencia de los parámetros geotécnicos en condición estática 185
4.7.6. Influencia paramétrica en condición pseudoestática e implicancias técnicas ... 186
4.7.7. Limitaciones estadísticas, probabilísticas y de representatividad 188
CONCLUSIONES 192
RECOMENDACIONES 195
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de síntesis del estado del arte 31
Tabla 2 Matriz de operacionalización de variables 66
Tabla 3 Proceso de excavación de calicatas y toma de muestras 87
Tabla 4 Comparación entre la profundidad de exploración y la profundidad aproximada de las superficies críticas 89
Tabla 5 Normas Técnicas de ensayos realizados 92
Tabla 6 Configuración general del análisis de estabilidad en Slide V6.004 96
Tabla 7 Instrumentos de recolección y procesamiento de datos 98
Tabla 8 Distribución espacial de las calicatas ejecutadas en los taludes del barrio La Recoleta 104
Tabla 9 Características de las calicatas ejecutadas en los taludes del barrio La Recoleta 106
Tabla 10 Integración entre mapeo de campo y ensayos geotécnicos 111
Tabla 11 Resumen de muestras consideradas por tipo de ensayo 113
Tabla 12 Densidad máxima y mínima 114
Tabla 13 Límite líquido de los suelos 116
Tabla 14 Ensayo de contenido de humedad natural (ASTM D2216) 117
Tabla 15 Distribución granulométrica y composición del suelo 120
Tabla 16 Propiedades de plasticidad y finos 121
Tabla 17 Clasificación geotécnica de las muestras mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) 122
Tabla 18 Gravedad específica y clasificación SUCS 124
Tabla 19 Resultados del ensayo de permeabilidad 125
Tabla 20 Parámetros geotécnicos representativos empleados en el modelamiento en Slide V6.004 127
Tabla 21 Comparación de factores de seguridad en condición estática 134
Tabla 22 Comparación de factores de seguridad en condición pseudoestática 140
Tabla 23 Comparación de factores de seguridad entre condición estática y pseudoestática 141
Tabla 24 Criterios considerados para el análisis de sensibilidad 144
Tabla 25 Análisis de sensibilidad en condición estática – zona de cresta 145
Tabla 26 Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – zona de cresta 146
Tabla 27 Análisis de sensibilidad en condición estática – zona media 147

Tabla 28 Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – zona media 148
Tabla 29 Análisis de sensibilidad en condición estática – pie del talud 149
Tabla 30 Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – pie del talud 150
Tabla 31 Resumen general de los parámetros con mayor respuesta del factor de seguridad 152
Tabla 32 Síntesis del análisis determinístico de sensibilidad para la hipótesis específica 4 154
Tabla 33 Análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo para la hipótesis específica 4 156
Tabla 34 Síntesis del análisis determinístico de sensibilidad para la hipótesis específica 5 159
Tabla 35 Análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo para la hipótesis específica 5 161
Tabla 36 Criterios generales considerados para la simulación Monte Carlo 164
Tabla 37 Parámetros de entrada utilizados en la simulación Monte Carlo 165
Tabla 38 Validación del modelo aproximado de respuesta mediante comparación con Slide V6.004 168
Tabla 39 Resultados de la simulación Monte Carlo en condición estática 170
Tabla 40 Resultados de la simulación Monte Carlo en condición pseudoestática 172
Tabla 41 Comparación de los resultados simulados entre condición estática y pseudoestática 173
Tabla 42 Interpretación general de los resultados obtenidos mediante Monte Carlo... 175
Tabla 43 Contrastación integrada de las hipótesis de investigación 178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ilustración del procedimiento de recogida de puntos en una superficie de deslizamiento 21
Figura 2 Deslizamiento rotacional asociado a condiciones geotécnicas desfavorables del talud 23
Figura 3 Esquema conceptual del análisis pseudoestático mediante equilibrio límite para una superficie de falla curva 24
Figura 4 Variación del factor de seguridad con el coeficiente sísmico horizontal kh 25
Figura 5 Esquema general de las fuerzas actuantes y resistentes en un talud. 36
Figura 6 Envolvente de falla según el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb. 38
Figura 7 Esquema de la teoría de esfuerzos efectivos de Terzaghi. 39
Figura 8 Diagrama de flujo metodológico del desarrollo de la investigación 65
Figura 9 Mapa satelital de extensión del área de estudio 75
Figura 10 Dimensiones referenciales del talud evaluado 75
Figura 11 Sector de exploración del talud dentro del área de análisis 90
Figura 12 Ubicación de calicatas 104
Figura 13 Perfiles esquemáticos geotécnicos del talud: Cresta - Zona media - Pie 109
Figura 14 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en la zona de cresta 130
Figura 15 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en la zona media 131
Figura 16 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en el pie del talud 133
Figura 17 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en la zona de cresta 136
Figura 18 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en la zona media 138
Figura 19 Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en el pie del talud 139
Figura 20 Variación del factor de seguridad frente a cambios en los parámetros geotécnicos bajo condición estática 155
Figura 21 Variación del factor de seguridad frente a cambios en los parámetros geotécnicos y sísmicos bajo condición pseudoestática 159

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de consistencia 205

ANEXO 2. Ubicación del área de estudio y distribución de calicatas 208

ANEXO 3. Registro fotográfico de campo 210

ANEXO 4. Registro de calicatas y toma de muestras 212

ANEXO 5. Resultados de ensayos de laboratorio 235

ANEXO 6. Resultados detallados del ensayo de corte directo 254

ANEXO 7. Modelamiento estático en Slide V6.004 263

ANEXO 8. Modelamiento pseudoestático en Slide V6.004 266

ANEXO 9. Respaldo del análisis de sensibilidad en Slide V6.004 269

ANEXO 10. Resultados de simulación Monte Carlo en condición estática 282

ANEXO 11. Resultados de simulación Monte Carlo en condición pseudoestática 285

ANEXO 12. Registro fotográfico de ensayos de laboratorio 288

ANEXO 13. Cálculo geométrico de la profundidad aproximada de las superficies críticas 298

ANEXO 14. Cálculo de indicadores descriptivos, ajuste lineal y correlación de Spearman para el análisis de respuesta paramétrica de las hipótesis específicas 4 y 5 301

ANEXO 15. Validación del modelo aproximado de respuesta empleado en la simulación Monte Carlo 315

ANEXO 16. Documentación complementaria 321

ANEXO 17. Respaldo del análisis estadístico de sensibilidad de la simulación Monte Carlo 326

INTRODUCCIÓN

En ingeniería geotécnica, el análisis de estabilidad de taludes posibilita evaluar la seguridad de zonas urbanas, infraestructuras y terrenos susceptibles a fenómenos de inestabilidad. La conducta de un talud se encuentra condicionada por su geometría, las cargas impuestas, los efectos sísmicos y los atributos geotécnicos del suelo. Entre los parámetros que inciden en la determinación del factor de seguridad figuran la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Los dos primeros caracterizan la resistencia al corte conforme al criterio de Mohr-Coulomb, en tanto que el peso unitario participa en las fuerzas y tensiones que gobiernan el equilibrio de la masa del terreno.

El barrio La Recoleta, ubicado en las inmediaciones del río Chili, en Arequipa, presenta condiciones topográficas y geotécnicas que requieren una evaluación detallada de la estabilidad de sus taludes. Para el análisis se consideraron tres zonas representativas: cresta, zona media y pie del talud, con la finalidad de evaluar las diferencias en los parámetros geotécnicos y su efecto sobre el factor de seguridad de cada sección. De esta manera, fue posible comparar la respuesta de las secciones frente a las condiciones estáticas y pseudoestáticas consideradas en la investigación.

La investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas durante 2026. El análisis incorporó como parámetros fundamentales la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo, cuantificados mediante la caracterización geotécnica y ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras representativas. Se evaluaron tres secciones correspondientes a la cresta, la zona media y el pie del talud, lo que permitió examinar la estabilidad de cada sector y comparar su respuesta ante las condiciones de análisis establecidas.

Se realizaron análisis de estabilidad con el programa Slide V6.004, aplicando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y utilizando el método de equilibrio límite de Spencer para determinar los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos que presenta cada una de las secciones estudiadas. En la condición pseudoestática se aplicó un coeficiente sísmico horizontal base, kh = 0.175, y un coeficiente sísmico vertical, kv = 0.00, que permitieron comprobar la pérdida de estabilidad inducida por la solicitación sísmica simplificada respecto de la condición estática.

Adicionalmente, se desarrolló un análisis determinístico de sensibilidad paramétrica mediante la variación individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en la condición pseudoestática, el coeficiente sísmico horizontal. Este procedimiento permitió evaluar la magnitud y dirección de los cambios del factor de seguridad manteniendo constantes la geometría y los demás parámetros del modelo.

Como complemento, se incorporó una simulación Monte Carlo mediante ModelRisk con 10 000 realizaciones por escenario, considerando seis escenarios de modelamiento diferenciados correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud bajo condiciones estática y pseudoestática. Este análisis permitió evaluar la distribución de los factores de seguridad y la proporción de realizaciones con FS < 1.00 dentro de los rangos de escenario adoptados. Asimismo, se desarrolló un análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional, con la finalidad de identificar la dirección y sensibilidad relativa de las variables de entrada cuando estas varían simultáneamente. Las realizaciones Monte Carlo corresponden a combinaciones numéricas del modelo y no se interpretan como observaciones geotécnicas independientes ni como inferencia estadística de la totalidad del sector.

Se determinó que la zona media presentó la condición más desfavorable, con factores de seguridad inferiores a la unidad tanto en el análisis estático como en el pseudoestático. La cresta presentó una condición relativamente más favorable, mientras que el pie del talud mostró resultados próximos al equilibrio límite, especialmente bajo condición pseudoestática. El análisis de sensibilidad evidenció que, en condición estática, el peso unitario presentó la mayor sensibilidad relativa en la cresta, mientras que el ángulo de fricción interna predominó en la zona media y el pie. En condición pseudoestática, la sensibilidad de la cresta se distribuyó entre las variables analizadas, mientras que en la zona media y el pie predominó el coeficiente sísmico horizontal, seguido principalmente por el ángulo de fricción interna. Estos resultados permitieron caracterizar la respuesta de las tres secciones frente a la variación de los parámetros geotécnicos y a la solicitación sísmica simplificada, proporcionando una base técnica para orientar evaluaciones e intervenciones futuras en el área de estudio.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Problemática de la investigación

En el ámbito internacional, los desastres asociados a amenazas naturales continúan afectando a la población, la infraestructura y las actividades económicas. El Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (2025) reportó 393 eventos de desastre, con un saldo de 16 753 fallecidos, 167.2 millones de personas afectadas y pérdidas económicas estimadas en US$ 241.95 mil millones. Aunque estas cifras corresponden al conjunto de desastres registrados, permiten dimensionar la necesidad de fortalecer la evaluación de las condiciones de seguridad del territorio. En el ámbito geotécnico, los análisis de estabilidad de taludes revisten importancia en zonas sometidas a precipitaciones intensas, acción sísmica y movimientos en masa de laderas.

Desde la perspectiva de la ingeniería geotécnica, la evaluación de la estabilidad de taludes requiere trascender el empleo de parámetros promediados de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario, toda vez que la heterogeneidad inherente de los depósitos de suelo genera variabilidad significativa en sus propiedades resistentes. Yang et al. (2023) determinaron que la cohesión ejerció la mayor influencia sobre la estabilidad de los taludes analizados, mientras que Wu et al. (2024) señalaron que el modelamiento bidimensional puede representar de manera simplificada la respuesta de suelos cuyas propiedades geotécnicas presentan variación.

Zhang et al. (2024) demostraron que la variación de los parámetros geotécnicos altera el factor de seguridad y el mecanismo de falla en taludes, particularmente cuando intervienen estratos de baja resistencia o fluctuaciones en las propiedades mecánicas del material. Consecuentemente, se requieren investigaciones que cuantifiquen el efecto de la variabilidad geotécnica en los factores de seguridad bajo solicitaciones estáticas y pseudoestáticas.

En el Perú, los movimientos en masa constituyen un problema recurrente debido a la geografía andina, la presencia de lluvias estacionales y la ocupación de zonas susceptibles. El Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2025) estimó que, para el periodo abril–junio de 2025, 1 653 890 personas ubicadas en 25 654 centros poblados estarían expuestas a riesgo muy alto frente a deslizamientos, flujos de detritos y otros movimientos en masa; además, 727 759 viviendas, 1 715 establecimientos de salud y 11 065 instituciones educativas se

encontrarían en la misma condición de riesgo.

Los informes técnicos desarrollados en el valle del río Chili han identificado la presencia de peligros geológicos en sus laderas y en sectores próximos a sus márgenes. INGEMMET realizó una inspección geológica en el sector Parque Ecológico, ubicado en la margen izquierda del río Chili, con la finalidad de identificar y evaluar condiciones de peligro que pudieran afectar a la población y a los terrenos adyacentes. Asimismo, el informe técnico A6846 evaluó peligros geológicos en las laderas del sector Alto Cayma, dentro de la cuenca del valle del río Chili. Estos antecedentes respaldan la necesidad de desarrollar evaluaciones geotécnicas específicas que permitan caracterizar las condiciones del terreno y analizar la estabilidad de los taludes en sectores urbanos próximos al cauce.

El barrio La Recoleta, ubicado en las inmediaciones del río Chili, requiere una evaluación específica de la estabilidad de sus taludes considerando las diferencias existentes en los parámetros geotécnicos del suelo. Si bien existen antecedentes sectoriales y regionales sobre peligros geológicos en el valle del río Chili, resulta necesario evaluar de manera específica la estabilidad estática y pseudoestática de las secciones representativas del sector, considerando parámetros diferenciados de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario. En ese contexto, la investigación busca responder la siguiente pregunta: ¿Cuál es la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?

1.2. Planteamiento del problema

1.2.1. *Problema general*

¿Cuál es la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?

1.2.2. *Problemas específicos*

- ¿Cómo se caracteriza la variabilidad de los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?
- ¿Cuál es el comportamiento de la estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?

- ¿Cuál es el comportamiento de la estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?
- ¿Cómo influyen la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, así como la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. *Justificación ambiental*

La caracterización de la estabilidad de taludes en La Recoleta fundamenta la formulación de estrategias preventivas ante procesos erosivos, desprendimientos y deslizamientos potencialmente capaces de transportar material hacia el río Chili. El examen de la heterogeneidad en las propiedades geotécnicas del terreno posibilita la delimitación de sectores con mayor propensión a la inestabilidad y establece los criterios técnicos requeridos para el diseño de esas intervenciones. El estudio amplía el conocimiento sobre las características geotécnicas de la zona analizada y constituye el fundamento para el desarrollo de acciones destinadas a la gestión y atenuación del riesgo.

1.3.2. *Justificación social*

La presente investigación posee relevancia social debido a que los procesos potenciales de inestabilidad de taludes pueden representar una amenaza para la población asentada en las inmediaciones del río Chili. Los deslizamientos o desprendimientos podrían afectar viviendas, vías de acceso vehicular y peatonal, espacios públicos y redes de servicios básicos, tales como agua potable, alcantarillado, energía eléctrica y telecomunicaciones. Por ello, la evaluación de la estabilidad de estos taludes constituye un aspecto importante para la seguridad de la población y para la continuidad del funcionamiento de la infraestructura urbana existente. En este contexto, los resultados del estudio proporcionan información técnica útil para identificar sectores con mayor susceptibilidad a la inestabilidad y orientar futuras decisiones de gestión del riesgo.

1.3.3. *Justificación económica*

Los procesos de inestabilidad de taludes pueden ocasionar daños materiales en viviendas, vías de acceso, redes de servicios básicos e infraestructura urbana, generando costos de reparación, interrupción de actividades y posibles pérdidas económicas. En ese sentido, la evaluación de la estabilidad considerando la variabilidad de los parámetros geotécnicos permite identificar las secciones con menor factor de seguridad y mayor susceptibilidad a la inestabilidad, proporcionando información técnica para orientar futuras medidas preventivas. Esto puede contribuir a una mejor asignación de recursos destinados a intervenciones técnicas, reducir posibles pérdidas económicas y favorecer una planificación urbana acorde con las condiciones de estabilidad del terreno en el entorno del barrio La Recoleta.

1.3.4. *Justificación metodológica*

La investigación se basa en la integración de un procedimiento sistemático y replicable para evaluar la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional de taludes, el cual pone en conexión la exploración del terreno mediante calicatas y ensayos de laboratorio junto con la caracterización de las zonas representativas del talud. Los parámetros obtenidos se incorporan al modelamiento correspondiente en el software Slide V6.004 para poder analizar la estabilidad de las secciones evaluadas ante condiciones estáticas y pseudoestáticas.

A diferencia de una evaluación basada únicamente en un valor geotécnico único o promedio, el estudio considera parámetros diferenciados de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario para las secciones de cresta, zona media y pie del talud, permitiendo comparar su comportamiento y reconocer diferencias en los factores de seguridad obtenidos. Asimismo, se incorpora un análisis de sensibilidad paramétrica para identificar el efecto individual de las variaciones de los parámetros sobre el factor de seguridad.

De manera complementaria, se desarrolla una simulación Monte Carlo mediante ModelRisk, con 10 000 realizaciones por escenario, orientada a evaluar la distribución del factor de seguridad dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados y, adicionalmente, a analizar la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Este procedimiento tiene carácter complementario y exploratorio, y no constituye una

caracterización probabilística poblacional de la variabilidad geotécnica del sector. La secuencia metodológica empleada puede constituir una referencia para evaluaciones preliminares de taludes urbanos ribereños con características semejantes, siempre que los parámetros y condiciones de modelamiento sean determinados específicamente para cada área de estudio.

1.3.5. *Justificación teórica*

La investigación se fundamenta en los principios de la mecánica de suelos y en la estabilidad de taludes, enfatizando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y los métodos de equilibrio límite para la determinación del FS. La cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario operan como parámetros determinantes en la caracterización de la resistencia al corte y las fuerzas que actúan en el interior del talud.

La investigación aporta al estudio de la variabilidad geotécnica mediante la comparación de las diferencias existentes en los parámetros evaluados entre las secciones representativas y su incidencia sobre los factores de seguridad obtenidos bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Asimismo, el análisis de sensibilidad permite determinar la respuesta del factor de seguridad ante la modificación individual de los parámetros geotécnicos y, para el caso pseudoestático, frente a la variación del coeficiente sísmico horizontal.

La investigación permite reconocer las limitaciones de evaluar la estabilidad únicamente mediante valores determinísticos aislados y evidencia la utilidad de complementar dicho enfoque con análisis de sensibilidad y, de manera exploratoria, con simulación Monte Carlo. Esta integración permite examinar la distribución simulada del FS y la sensibilidad estadística de la respuesta dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados, sin interpretar los resultados como una caracterización probabilística poblacional del terreno.

1.3.6. *Justificación tecnológica*

El análisis se fundamenta en el uso de herramientas computacionales para modelar y evaluar la estabilidad de taludes. Slide V6.004 permite desarrollar modelos bidimensionales mediante métodos de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. De manera complementaria, ModelRisk permite ejecutar la simulación Monte Carlo para evaluar la distribución simulada del FS y la sensibilidad estadística de la respuesta mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y

contribución proporcional. El alcance de estos resultados se encuentra limitado a los rangos y distribuciones adoptados para cada escenario.

Estas herramientas facilitan el procesamiento de los datos, la interpretación de los resultados y la comparación de las secciones del talud frente a los escenarios de sensibilidad evaluados. Su aplicación proporciona una base de cálculo organizada para examinar la respuesta del talud ante la variación de los parámetros considerados y sustentar decisiones técnicas relacionadas con su estabilidad.

1.4. Delimitación de la investigación

1.4.1. *Delimitación espacial*

La investigación se desarrolló en los taludes del barrio La Recoleta, ubicados en la margen del río Chili, distrito, provincia y departamento de Arequipa. El tramo evaluado presentó una longitud aproximada de 0.52 km. Dentro del área de estudio se consideraron tres posiciones representativas del talud: cresta, zona media y pie, en las cuales se desarrolló la caracterización geotécnica y posteriormente se definieron las secciones representativas para el análisis de estabilidad. La ubicación de las calicatas y sus coordenadas UTM, correspondientes a la zona 19K, se presentan en la Tabla 8 y la Figura 12.

1.4.2. *Delimitación temporal*

La investigación comprendió las actividades de campo y laboratorio desarrolladas entre noviembre y diciembre de 2025, así como el procesamiento y análisis de la información efectuados posteriormente durante la elaboración de la tesis en 2026. Los trabajos de campo se realizaron entre el 18 y el 20 de noviembre de 2025 en el barrio La Recoleta, margen del río Chili, e incluyeron el reconocimiento geotécnico del sector, la excavación de nueve calicatas y la obtención de muestras de suelo.

De acuerdo con la constancia emitida por el Laboratorio de Ensayo de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María, los ensayos de laboratorio se desarrollaron entre el 17 de noviembre y el 12 de diciembre de 2025. Durante este periodo se realizaron los ensayos físicos y mecánicos considerados para la caracterización del terreno. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron procesados en gabinete para desarrollar el modelamiento de estabilidad, el análisis de sensibilidad, la simulación Monte Carlo complementaria y la interpretación de los resultados.

La campaña de campo se desarrolló en una única etapa de exploración durante

noviembre de 2025. Por esta razón, el alcance temporal de la investigación no comprendió campañas adicionales de muestreo ni el seguimiento estacional de las condiciones geotécnicas o hidráulicas del talud.

1.4.3. *Delimitación temática*

La investigación se enfocó en el análisis de la influencia de la variabilidad geotécnica sobre la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta. Para ello, se consideraron como parámetros principales la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo. El análisis de estabilidad se desarrolló mediante modelamiento bidimensional por equilibrio límite, empleando el criterio de resistencia Mohr–Coulomb y el método de Spencer para el cálculo de los FS reportados.

Asimismo, el estudio incluyó un análisis determinístico de sensibilidad de los parámetros geotécnicos y una simulación Monte Carlo complementaria para evaluar la distribución del FS y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. La investigación no comprendió análisis dinámicos tiempo-historia, modelamiento tridimensional de estabilidad, monitoreo piezométrico, diseño definitivo de obras de estabilización, modelamiento hidráulico ni análisis de socavación del río Chili.

1.4.4. *Delimitación metodológica*

El estudio se fundamentó en un enfoque cuantitativo sustentado en datos procedentes de nueve calicatas distribuidas en tres sectores de exploración. En cada sector, las calicatas fueron localizadas en la cresta, la zona media y el pie del talud, con el objetivo de caracterizar las condiciones geotécnicas en tales posiciones geomorfológicas.

La caracterización física del terreno se llevó a cabo a partir de las muestras extraídas durante el proceso de exploración geotécnica. Los parámetros mecánicos relacionados con la resistencia al corte utilizados en los modelamientos provienen de tres muestras representativas, una de cada zona evaluada.

Para efectos de la presente investigación, se denomina zona representativa a la posición geomorfológica del talud donde se realizaron actividades de exploración, muestreo y caracterización geotécnica, correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud. Se denomina sector de exploración a cada uno de los tres lugares distribuidos

longitudinalmente en el área de estudio, dentro de los cuales se ubicó una calicata en la cresta, una en la zona media y una en el pie. En cambio, se denomina sección representativa al perfil bidimensional seleccionado para el modelamiento de estabilidad mediante Slide V6.004 y para la obtención del correspondiente factor de seguridad. Las tres secciones analizadas representan las zonas evaluadas y no constituyen tres taludes independientes.

El modelado bidimensional se realizó con Slide V6.004 bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para la condición pseudoestática se empleó un coeficiente sísmico horizontal referencial kh = 0,175 y un coeficiente vertical kv = 0,00. No se realizaron mediciones directas del nivel freático ni de la presión de poros mediante instrumentación piezométrica; por ello, en los modelos no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros. Esta condición corresponde al escenario de modelamiento adoptado y no constituye evidencia de ausencia de agua en profundidad.

El análisis se complementó con un estudio determinístico de sensibilidad y una simulación Monte Carlo mediante ModelRisk a fin de evaluar la distribución del factor de seguridad y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada dentro de los rangos y distribuciones de escenario definidos para los parámetros de entrada. Los resultados obtenidos son representativos únicamente de las tres secciones analizadas y no han de extrapolarse al total de los taludes del barrio de La Recoleta sin llevar a cabo investigaciones geotécnicas adicionales.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. *Objetivo general*

Determinar la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.

1.5.2. *Objetivos específicos*

- Caracterizar la variabilidad de los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.
- Determinar la estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.
- Determinar la estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones

representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.

- Determinar cómo influye la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.
- Determinar cómo influyen la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, así como la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.

1.6. Hipótesis

1.6.1. *Hipótesis general*

La variabilidad geotécnica influye en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.

1.6.2. *Hipótesis específicas*

- Los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario presentan variaciones entre las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.
- La estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas del talud varía según los parámetros geotécnicos adoptados para la cresta, zona media y pie del talud.
- La estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones representativas del talud presenta reducción de los factores de seguridad respecto a la condición estática, debido a la incorporación del coeficiente sísmico horizontal.
- Las variaciones controladas de la cohesión, del ángulo de fricción interna y del peso unitario influyen en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática, produciendo cambios dentro de los rangos de sensibilidad evaluados.
- Las variaciones controladas de la cohesión, del ángulo de fricción interna, del peso unitario y del coeficiente sísmico horizontal kh influyen en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática, produciendo cambios dentro de los rangos de sensibilidad evaluados.

1.7. Variables y matriz de operacionalización

1.7.1. *Variables de la investigación*

La investigación estableció como variable independiente la variabilidad geotécnica, expresada mediante los parámetros de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario del suelo. Estos parámetros fueron considerados como datos de entrada para el modelamiento y análisis bidimensional de la estabilidad del talud.

La variable dependiente corresponde a la estabilidad bidimensional del talud, evaluada mediante los FS obtenidos bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Asimismo, se considera la variación del factor de seguridad, el margen de seguridad y la sensibilidad del FS frente a los cambios de los parámetros geotécnicos. De manera complementaria, se incorpora la simulación Monte Carlo para evaluar, dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados, la distribución del FS, la proporción de realizaciones con FS < 1.00 y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Este procedimiento complementario no constituye una variable ni una dimensión adicional de la variable dependiente.

1.7.2. *Variable independiente*

Variable independiente: Variabilidad geotécnica.

Dimensiones de la variable independiente:

1. Cohesión.
2. Ángulo de fricción interna.
3. Peso unitario.

1.7.3. *Variable dependiente*

Variable dependiente: Estabilidad bidimensional del talud.

Dimensiones de la variable dependiente:

1. Estabilidad estática.
2. Estabilidad pseudoestática.
3. Evaluación comparativa del FS.
4. Sensibilidad del FS.

La simulación Monte Carlo fue utilizada para evaluar la distribución del factor de seguridad (FS), y así determinar la proporción de realizaciones con FS < 1.00 y la

sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango y coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional, en los rangos y distribuciones de escenario considerados. Este procedimiento no es en sí una dimensión más de la variable dependiente.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Antecedentes internacionales*

Yang et al. (2023), en el artículo científico titulado Slope Stability Prediction Method Based on Intelligent Optimization and Machine Learning Algorithms, abordaron la necesidad de mejorar la predicción de la estabilidad de taludes considerando múltiples variables geotécnicas y geométricas. El objetivo fue desarrollar y evaluar modelos de aprendizaje automático optimizados para clasificar la condición de estabilidad de taludes. La investigación utilizó una base de 117 casos de taludes y consideró como variables de entrada el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna, el coeficiente de presión de poros, el ángulo del talud y su altura. Los resultados del análisis de influencia mostraron que la cohesión presentó el mayor grado de incidencia sobre la estabilidad, con un factor de influencia de 0.327. Los autores concluyeron que los parámetros resistentes del suelo tienen un papel determinante en la predicción de la condición de estabilidad. Este antecedente es relevante para la presente investigación porque sustenta la evaluación diferenciada de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario como variables que pueden modificar la respuesta de estabilidad del talud.

Wu et al. (2024), en el artículo científico titulado Comparing 2D and 3D Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Random Finite-Element Method, analizaron la influencia de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo mediante una comparación entre modelos bidimensionales y tridimensionales. El objetivo fue determinar las diferencias existentes entre ambas aproximaciones respecto al FS y al mecanismo de falla en suelos espacialmente variables. La metodología empleó el método de elementos finitos aleatorios y simulaciones de las propiedades geotécnicas del suelo. Los resultados evidenciaron una correlación positiva importante entre los factores de seguridad obtenidos mediante los modelos 2D y 3D, alcanzándose un coeficiente de correlación de Spearman de 0.83. Asimismo, el análisis bidimensional tendió a proporcionar resultados más conservadores que el tridimensional en determinados escenarios. Los autores concluyeron que la representación bidimensional resulta útil para el análisis de estabilidad, aunque puede simplificar los efectos espaciales tridimensionales del suelo. Este antecedente sustenta el empleo del análisis bidimensional en la presente investigación y, al mismo tiempo, permite reconocer sus limitaciones frente a la variabilidad espacial real del terreno.

Zhang et al. (2024), en el artículo científico titulado Effect of Structural Characteristics on the Stability of Multi-Weak Rock Slopes Considering the Spatial Variability of Geotechnical Parameters, evaluaron el efecto conjunto de las características estructurales y de la variabilidad espacial de los parámetros geotécnicos sobre la estabilidad de taludes rocosos con múltiples capas débiles. El estudio analizó diferentes configuraciones de ángulo del talud, inclinación de las capas débiles y altura mediante modelos con parámetros geotécnicos variables. Los resultados del análisis de sensibilidad determinaron coeficientes de 1.0396 para el ángulo del talud, 0.3661 para el ángulo de las capas débiles y 0.3196 para la altura, identificándose al ángulo del talud como la variable estructural de mayor incidencia. Asimismo, en determinados modelos el incremento del ángulo del talud produjo reducciones del FS cercanas al 50 %. Los autores concluyeron que tanto la configuración geométrica como la variabilidad de las propiedades geotécnicas modifican la estabilidad y el mecanismo potencial de falla. Este antecedente resulta pertinente porque evidencia que la interpretación de la variabilidad geotécnica debe realizarse considerando también la geometría del talud, aspecto reconocido como una limitación y condición de modelamiento en la presente investigación.

Yu et al. (2025), en el artículo científico titulado Probabilistic Slope Stability Analysis on Marine Clay Seabed Considering Spatial Variability of Soil Parameters, evaluaron la estabilidad de taludes submarinos mediante un análisis probabilístico que incorporó la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. El estudio buscó establecer la incidencia de esta variabilidad en el FS y en los indicadores de confiabilidad. Para ello, integraron el método de equilibrio límite, los campos aleatorios y la simulación Monte Carlo, considerando variaciones de la resistencia no drenada y la presencia de estratos de menor resistencia. Los resultados mostraron que el índice de confiabilidad fue más sensible cuando el coeficiente de variación del parámetro asociado al incremento de la resistencia con la profundidad se situó, aproximadamente, entre 0.10 y 0.30. También advirtieron que omitir la variabilidad espacial podía modificar considerablemente la estimación probabilística de la estabilidad. Los autores concluyeron que el análisis probabilístico debía complementar la evaluación determinística para representar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos. Este antecedente aportó sustento al uso complementario de la simulación Monte Carlo en la presente investigación, al permitir examinar la variación del FS ante cambios simultáneos en los parámetros de entrada. Su relación metodológica se centró en el tratamiento de la incertidumbre, sin que ello

implicara una equivalencia entre la representación mediante campos aleatorios y la variación de parámetros adoptada en este estudio, cuyo procedimiento principal fue el modelamiento determinístico.

Li et al. (2021), en el artículo científico titulado The Effects of Seismic Coefficient Uncertainty on Pseudo-Static Slope Stability: A Probabilistic Sensitivity Analysis, analizaron el efecto de la incertidumbre asociada al coeficiente sísmico sobre la estabilidad pseudoestática de taludes. El objetivo fue evaluar probabilísticamente la influencia de los coeficientes sísmicos y de otras variables geotécnicas y geométricas sobre la respuesta de estabilidad. La metodología combinó análisis pseudoestático, análisis límite y técnicas probabilísticas de sensibilidad, considerando como variables los parámetros de resistencia del suelo, el peso unitario, la geometría y el coeficiente sísmico horizontal. Los resultados demostraron que el grado de incertidumbre de las variables modifica las distribuciones probabilísticas y la probabilidad de falla, identificándose al coeficiente sísmico horizontal como la segunda variable de mayor importancia después de los parámetros de resistencia del suelo. Los autores concluyeron que la selección y variabilidad del coeficiente sísmico pueden afectar de manera importante los resultados de estabilidad pseudoestática. Este antecedente sustenta la incorporación del coeficiente horizontal kh en el análisis de sensibilidad de la presente investigación y respalda que su valor sea interpretado como un parámetro de modelamiento cuya influencia debe ser evaluada.

Liu et al. (2026), en un estudio de estabilidad de taludes mediante el método de reducción de resistencia y diseño experimental ortogonal, desarrollaron complementariamente un análisis de sensibilidad en el que los principales parámetros fueron modificados individualmente en ±10 % respecto de sus valores base, manteniendo constantes los demás parámetros. Los autores emplearon este procedimiento como una evaluación cualitativa de consistencia de la respuesta del FS y no como una estimación formal de incertidumbre. Por su parte, Hammouti et al. (2026) desarrollaron un análisis de estabilidad mediante reducción c-φ y elementos finitos, incorporando un análisis de sensibilidad de parámetros mediante variaciones de ±20 %. En dicho análisis evaluaron, entre otros, la densidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna, identificando una elevada sensibilidad del FS frente a los parámetros resistentes. Estos antecedentes sustentaron el uso de variaciones porcentuales controladas respecto de los valores base para evaluar la sensibilidad de la estabilidad del talud a los parámetros geotécnicos. Este

procedimiento permitió analizar escenarios exploratorios, sin asumir que las variaciones aplicadas representaran la variabilidad espacial real del terreno.

2.1.2. *Antecedentes nacionales*

Garcés Gálvez (2023), en la tesis de pregrado titulada Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes, elaborada en la Universidad de Piura, analizó la influencia de la incertidumbre de las propiedades del suelo sobre la estabilidad de taludes. El estudio consideró taludes sintéticos y un caso de aplicación práctica bajo solicitaciones estáticas y pseudoestáticas. El análisis se desarrolló mediante Slide V6.0, empleando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb, los métodos de equilibrio límite de Spencer y Morgenstern-Price, así como los procedimientos probabilísticos Hipercubo Latino y FOSM. Los resultados mostraron que el cumplimiento de los criterios determinísticos del factor de seguridad no garantizaba por sí solo una condición favorable desde la perspectiva probabilística. La cohesión y el ángulo de fricción interna presentaron la mayor incidencia sobre la estabilidad, mientras que el peso unitario contribuyó con menos del 5 % de la variabilidad total del FS en los escenarios evaluados. El autor concluyó que el análisis probabilístico complementa la evaluación determinística al incorporar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos. Este antecedente constituye una referencia metodológica para la presente investigación por el empleo de modelamiento bidimensional en Slide, métodos de equilibrio límite y parámetros geotécnicos variables.

Durand Salas y Ramos Arias (2022), en la tesis de pregrado titulada Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad de taludes en suelos arenosos del sector Lomo de Corvina, Villa El Salvador, desarrollada en la Universidad Ricardo Palma, analizaron taludes de un sector urbano conformado por suelos arenosos y susceptible a deslizamientos. La investigación comparó los enfoques determinístico y probabilístico mediante el software Slide, considerando parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso específico del suelo. La evaluación comprendió tres secciones ubicadas en las progresivas 0+680, 0+820 y 0+1000. El análisis probabilístico incorporó la incertidumbre de los parámetros geotécnicos y permitió complementar la interpretación de los factores de seguridad determinísticos. Este antecedente se relaciona con la presente investigación por el empleo de parámetros geotécnicos semejantes, el modelamiento mediante Slide, el análisis de varias secciones representativas y la incorporación de un análisis probabilístico complementario para evaluar la respuesta de la estabilidad frente a

variaciones de las propiedades del suelo.

Bustillos Cotrado (2024), en el artículo científico titulado Análisis bidimensional de estabilidad del talud en una zona de falla geológica en Chinchao, Huánuco, Perú, evaluó la estabilidad de un talud ubicado entre las progresivas km 37+700 y km 37+800 de la ruta nacional PE-18A, a la altura de Pachachupán, Chinchao. El estudio se desarrolló mediante métodos de equilibrio límite, bajo un enfoque cuantitativo, nivel descriptivo y diseño no experimental, seleccionándose intencionalmente el talud considerado más desfavorable para el análisis. Los resultados determinaron un factor de seguridad estático de 0.381 y un factor de seguridad pseudoestático de 0.214, ambos inferiores a la unidad. Se concluyó que el talud presentaba una condición de inestabilidad tanto en el escenario estático como en el pseudoestático considerado. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación porque evidencia, mediante resultados cuantitativos, la disminución del factor de seguridad al incorporar una acción sísmica simplificada y sustenta la comparación entre las condiciones estática y pseudoestática.

Layme Anchapuri (2022), en la tesis de pregrado titulada Análisis comparativo de la estabilidad de taludes naturales a partir de métodos de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas en Caballuni, Juncal-Puno, 2022, desarrollada en la Universidad Nacional del Altiplano, cuantificó y comparó los factores de seguridad de taludes naturales bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas mediante métodos de equilibrio límite y herramientas de modelamiento geotécnico. En condición estática se obtuvieron factores de seguridad superiores a la unidad, con valores de 1.04 mediante el método de Fellenius y 1.12 mediante el método de Bishop. En condición pseudoestática, varios de los resultados disminuyeron por debajo de la unidad, obteniéndose factores de seguridad de 0.71, 0.77 y 0.78 según los métodos analizados. El estudio concluyó que la incorporación de la acción sísmica simplificada modifica desfavorablemente la estabilidad de los taludes y que resulta necesaria la consideración de medidas de mitigación. Este antecedente respalda la comparación entre las condiciones estática y pseudoestática desarrollada en la presente investigación.

2.1.3. *Antecedentes regionales y locales*

Rivera Porras y Cueva Sandoval (2017), en el informe técnico N.° A6761 titulado Inspección geológica de la margen izquierda del río Chili, sector Parque Ecológico. Distrito Alto Selva Alegre, provincia Arequipa, región Arequipa, elaborado por INGEMMET, evaluaron los peligros geológicos que podían afectar a la población y a los

terrenos ubicados en sectores adyacentes a la margen izquierda del río Chili. El estudio comprendió el reconocimiento de las características geológicas y geomorfológicas del sector con la finalidad de identificar las condiciones de peligro existentes y formular recomendaciones orientadas a su evaluación y prevención. Este antecedente constituye una referencia local para la presente investigación debido a que corresponde a un sector urbano vinculado al río Chili y respalda la necesidad de desarrollar estudios específicos que permitan caracterizar el terreno y evaluar la estabilidad de los taludes próximos a su cauce.

Vela Valdez y Soncco Calsina (2018), en el informe técnico N.° A6846 titulado Peligros geológicos en zonas de exploración de laderas en la cuenca del valle del río Chili, sector Alto Cayma, Arequipa, elaborado por INGEMMET, analizaron los peligros geológicos presentes en las laderas de la cuenca del río Chili. El estudio tuvo como finalidad identificar y clasificar los procesos vinculados con movimientos en masa y otros peligros que podían afectar centros poblados, infraestructura y vías de comunicación, además de reconocer las condiciones que favorecían su desarrollo. En el sector evaluado se identificaron áreas con presencia de deslizamientos y zonas susceptibles a deslizamientos y derrumbes, relacionadas, entre otros aspectos, con la configuración geomorfológica de las laderas y el fracturamiento del terreno. A partir de los resultados, los autores formularon recomendaciones orientadas a reducir y mitigar las condiciones de riesgo identificadas. Este antecedente guarda relación directa con la presente investigación, debido a que evidencia la ocurrencia de procesos de inestabilidad en laderas de la cuenca del río Chili y respalda la necesidad de desarrollar evaluaciones geotécnicas específicas en sectores urbanos de Arequipa.

2.2. Estado del arte

Permite identificar la evolución de los estudios relacionados con la estabilidad de taludes, la variabilidad geotécnica y el análisis bidimensional bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. La revisión muestra que los métodos de equilibrio límite continúan siendo ampliamente utilizados en la práctica geotécnica, debido a su aplicabilidad para estimar factores de seguridad en taludes de suelo y roca. Asimismo, se observa una tendencia creciente hacia la incorporación de análisis de sensibilidad y procedimientos probabilísticos complementarios, con la finalidad de evaluar cómo la variación de los parámetros geotécnicos modifica la respuesta de estabilidad.

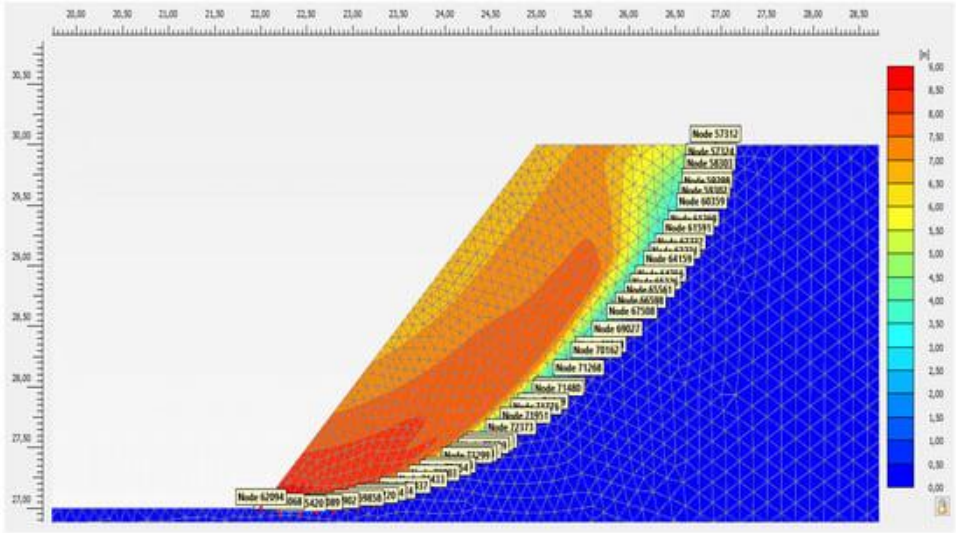
2.2.1. Evolución del análisis de estabilidad de taludes

Constituye un aspecto central de la ingeniería geotécnica, debido a que permite evaluar la posibilidad de falla de masas de suelo o roca frente a determinadas condiciones geométricas, resistentes, hidráulicas y sísmicas. La literatura reciente señala que el análisis de estabilidad continúa siendo indispensable en el diseño y evaluación de obras civiles, ya que el FS permite estimar la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes que pueden inducir el deslizamiento del talud (Rotaru et al., 2022; Sengani & Allopi, 2022).

Las primeras evaluaciones se fundamentaron principalmente en procedimientos empíricos basados en la observación de fallas y en información obtenida directamente en campo. Con el avance de la mecánica de suelos se desarrollaron métodos analíticos de equilibrio límite que incorporaron la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario en el cálculo del FS. Estos métodos continúan siendo ampliamente utilizados en ingeniería geotécnica por su utilidad práctica y su aplicación en el análisis de estabilidad de taludes (Rotaru et al., 2022; Bravo-Zapata et al., 2022).

Figura 1

Ilustración del procedimiento de recogida de puntos en una superficie de deslizamiento



Nota. Tomado de Rotaru et al. (2022).

Dentro de los métodos de equilibrio límite, se han desarrollado diferentes formulaciones, como Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern–Price, las cuales difieren en la forma de considerar el equilibrio de fuerzas, momentos y fuerzas entre dovelas. Investigaciones recientes confirman que estos métodos siguen siendo relevantes en el análisis bidimensional de taludes, aunque sus resultados pueden variar según el tipo de suelo, la geometría, la superficie de falla y las hipótesis adoptadas en el cálculo (Alok et al., 2024; Sengani & Allopi, 2022).

Con el avance de las herramientas computacionales, los métodos numéricos y los programas especializados han permitido representar con mayor facilidad el comportamiento del talud bajo diferentes condiciones de análisis. Sin embargo, los métodos de equilibrio límite continúan siendo una alternativa ampliamente utilizada en estudios geotécnicos, debido a que permiten obtener factores de seguridad de manera ordenada y comparativa. En este contexto, softwares como Slide facilitan el análisis bidimensional de estabilidad, incorporando métodos de equilibrio límite y condiciones estáticas o pseudoestáticas (Bravo-Zapata et al., 2022; Rotaru et al., 2022).

Además, las investigaciones recientes han mostrado que el FS no depende únicamente de la geometría del talud, sino también de la variabilidad de los parámetros geotécnicos. Zeng et al. (2024) evidenciaron que los cambios en parámetros como el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción interna pueden modificar los factores de seguridad obtenidos. Este planteamiento evidencia la necesidad de no limitar el análisis

a valores puntuales de los parámetros geotécnicos, sino de examinar la incidencia de su variación sobre la respuesta de estabilidad del talud (Zeng et al., 2024).

Bajo este criterio, la investigación se desarrolla mediante un análisis bidimensional basado en métodos de equilibrio límite, orientado a determinar los FS en condiciones estáticas y pseudoestáticas de los taludes del barrio La Recoleta, ubicados en la margen del río Chili. Este procedimiento es consistente con la evaluación geotécnica de estabilidad, siempre que los parámetros considerados en el modelamiento sean caracterizados de manera adecuada y se analice su incidencia sobre los factores de seguridad obtenidos. Para ello, se incorpora un análisis de sensibilidad y, de forma complementaria, una simulación Monte Carlo que permite examinar la respuesta del modelo frente a la variación de los parámetros de entrada.

2.2.2. Evolución del estudio de la variabilidad geotécnica

Se refiere a los cambios que pueden presentar las propiedades del suelo dentro de un mismo talud o entre diferentes sectores del terreno. Parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario no siempre son constantes, debido a factores como la estratigrafía, humedad, densidad, compactación, meteorización y condiciones propias de formación del suelo. Esta variación puede modificar los FS obtenidos en los análisis de estabilidad, por lo que resulta necesario considerar su influencia en la evaluación geotécnica (Zhang et al., 2024; Zeng et al., 2024).

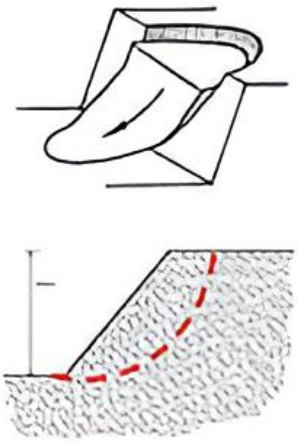
La cohesión constituye uno de los parámetros resistentes más importantes en el análisis de estabilidad de taludes, debido a que representa parte de la resistencia al corte del suelo. Cuando la cohesión disminuye, la capacidad resistente del material también se reduce, lo cual puede generar menores factores de seguridad y aumentar la susceptibilidad a la inestabilidad. Yang et al. (2023) identificaron que la cohesión puede ser uno de los parámetros con mayor influencia en la estabilidad, especialmente en taludes donde existen materiales con resistencia variable.

El ángulo de fricción interna constituye otro parámetro determinante en la estabilidad de taludes, debido a su relación directa con la resistencia friccional que desarrolla el suelo frente a posibles desplazamientos. La disminución de este parámetro puede reducir el FS y favorecer la formación de superficies de falla, especialmente en materiales granulares o en suelos que presentan menor resistencia al corte. Por tanto, la evaluación conjunta de la cohesión y el ángulo de fricción interna permite caracterizar

con mayor precisión la respuesta del talud frente a condiciones geotécnicas desfavorables (Zhang et al., 2024; Zeng et al., 2024).

Figura 2

Deslizamiento rotacional asociado a condiciones geotécnicas desfavorables del talud



Nota. El deslizamiento rotacional se presenta con mayor frecuencia en suelos cohesivos, macizos rocosos altamente fracturados, materiales meteorizados y taludes conformados por roca estéril, donde la disminución de la resistencia al corte favorece el desarrollo de superficies de falla curvas. Adaptado de Hoek y Bray (1981), Rock Slope Engineering.

El peso unitario del suelo representa otro parámetro relevante, debido a que influye en las fuerzas actuantes dentro del talud. A diferencia de la cohesión y del ángulo de fricción interna, que aportan resistencia, el incremento del peso unitario tiende a aumentar las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de suelo. Por ello, un mayor peso unitario puede reducir el factor de seguridad, especialmente en taludes con geometría desfavorable o con sectores de baja resistencia (Bravo-Zapata et al., 2022; Zeng et al., 2024).

Los estudios recientes indican que el análisis de sensibilidad constituye una herramienta útil para reconocer cuáles parámetros producen mayores variaciones en el factor de seguridad. Este procedimiento se basa en modificar de forma controlada los valores de entrada del modelo, como la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, con la finalidad de observar los cambios generados en la respuesta del talud. A partir de esta evaluación es posible identificar qué parámetro presenta mayor incidencia sobre la estabilidad y qué sectores muestran una respuesta más susceptible frente a variaciones en las propiedades geotécnicas del suelo (Yang et al., 2023; Zeng et al., 2024).

La variabilidad geotécnica se evaluó a partir de los valores de cohesión, ángulo de

fricción interna y peso unitario obtenidos para las secciones representativas del talud. Estos parámetros fueron relacionados con los factores de seguridad calculados bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, con la finalidad de analizar su influencia sobre la estabilidad bidimensional de la cresta, zona media y pie del talud.

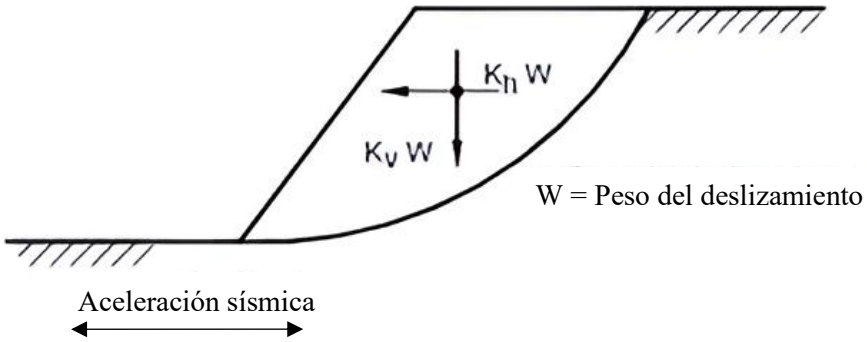
2.2.3. Evolución del análisis bidimensional estático y pseudoestático

La incorporación de las acciones sísmicas amplió el alcance del análisis de estabilidad de taludes en zonas de actividad sísmica. Las primeras evaluaciones se desarrollaron bajo condiciones estáticas y consideraron, principalmente, el peso propio del suelo, la geometría del talud y los parámetros de resistencia del material. En este enfoque, el FS expresa la relación entre la resistencia disponible y la requerida para mantener el equilibrio frente al deslizamiento (Duncan et al., 2014).

Con el desarrollo de la ingeniería geotécnica sísmica, se incorporó el análisis pseudoestático, que representa la acción del sismo mediante una fuerza horizontal equivalente aplicada a la masa potencialmente inestable. Esta aproximación permite considerar de forma simplificada los efectos del movimiento sísmico a través del coeficiente sísmico horizontal kh. La selección de este coeficiente toma en cuenta la amenaza sísmica del área, las características del terreno y los criterios de seguridad adoptados para la evaluación (Kramer, 1996; Li et al., 2021).

Figura 3

Esquema conceptual del análisis pseudoestático mediante equilibrio límite para una superficie de falla curva



Nota. La figura representa el análisis pseudoestático mediante equilibrio límite, en el que se aplican fuerzas horizontales y verticales a la masa potencialmente inestable para aproximar los efectos de la acción sísmica. Adaptado de Kramer (1996).

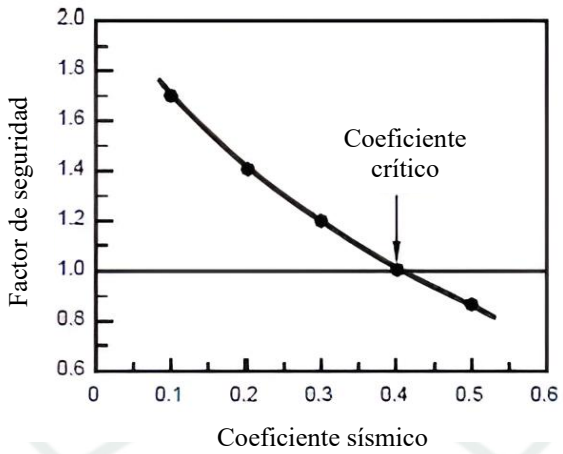
Como se observa en la Figura 3, las fuerzas pseudoestáticas modifican el

equilibrio del talud al incorporar las solicitaciones asociadas al sismo. Cuando estas fuerzas actúan en sentido desfavorable, incrementan las acciones que favorecen el deslizamiento. Esta representación constituye la base del análisis pseudoestático y permite evaluar, de manera simplificada, la influencia de la acción sísmica en la estabilidad del terreno (Kramer, 1996; Bray & Travasarou, 2011).

La incorporación del coeficiente sísmico horizontal en sentido desestabilizador reduce el FS respecto de la condición estática, debido al aumento de las fuerzas que favorecen el movimiento de la masa de suelo. Bray y Travasarou (2011) señalan que el análisis pseudoestático puede emplearse en evaluaciones preliminares y de diseño, siempre que el coeficiente sísmico horizontal se seleccione con criterios adecuados y se consideren las limitaciones del procedimiento frente a los métodos de análisis dinámico.

Figura 4

Variación del FS con el coeficiente sísmico horizontal kh



Nota. La figura muestra la relación inversa entre el coeficiente sísmico horizontal kh y el FS del talud. Conforme aumenta la intensidad de la acción sísmica representada por kh, el FS disminuye progresivamente hasta alcanzar una condición límite de estabilidad. Adaptado de Bray y Travasarou (2011).

La Figura 4 evidencia que el incremento del coeficiente sísmico horizontal reduce progresivamente el factor de seguridad, confirmando que la acción sísmica ejerce una influencia desfavorable sobre la estabilidad de los taludes. Este comportamiento justifica la incorporación del análisis pseudoestático en regiones con amenaza sísmica, especialmente cuando se requiere comparar la estabilidad del talud bajo condiciones estáticas y sísmicas simplificadas (Bray & Travasarou, 2011; Li et al., 2021).

En los años recientes, las investigaciones han mostrado una mayor orientación hacia la comparación entre los resultados obtenidos en condiciones estáticas y

pseudoestáticas, con la finalidad de determinar la disminución del FS asociada a la acción sísmica. Este tipo de evaluación permite estimar el margen de seguridad disponible y reconocer sectores donde la condición del talud puede variar desde un estado estable hacia una situación marginal o de inestabilidad (Jibson, 2011; Li et al., 2021).

En conjunto, la evolución del análisis estático hacia el análisis pseudoestático evidencia la necesidad de incorporar el efecto sísmico en la evaluación de estabilidad de taludes ubicados en regiones sísmicamente activas. Bajo este contexto, la presente investigación emplea ambos enfoques para evaluar la estabilidad bidimensional de los taludes del barrio La Recoleta y analizar la influencia de la variabilidad geotécnica sobre los factores de seguridad obtenidos.

2.2.4. Tendencias actuales, limitaciones y controversias en la investigación

La literatura reciente muestra que los estudios de estabilidad de taludes han pasado de enfocarse únicamente en la obtención de un factor de seguridad determinístico hacia evaluaciones que consideran la influencia de los parámetros geotécnicos sobre la respuesta del talud. En este sentido, los análisis de sensibilidad han adquirido importancia porque permiten identificar qué variables generan mayores cambios en el factor de seguridad, especialmente cuando se modifican la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo (Phoon & Ching, 2015; Zeng et al., 2024).

En trabajos recientes también se han empleado perturbaciones porcentuales controladas para evaluar la sensibilidad paramétrica, mediante variaciones individuales alrededor de valores base y comparación de la respuesta del factor de seguridad (Liu et al., 2026; Hammouti et al., 2026).

La comparación entre condiciones estáticas y pseudoestáticas permite evaluar la influencia de la acción sísmica en la estabilidad de taludes, particularmente en zonas de elevada sismicidad. Mediante el coeficiente sísmico horizontal kh, el análisis pseudoestático incorpora una fuerza equivalente que representa de forma simplificada la solicitación sísmica. Así, se contrasta la estabilidad bajo la acción de la gravedad con aquella que incluye el efecto sísmico considerado. Su alcance es aproximado, ya que no reproduce de manera integral la respuesta dinámica del suelo durante un sismo (Kramer, 1996; Bray & Travasarou, 2011).

Asimismo, se observa una tendencia creciente hacia el uso de herramientas probabilísticas complementarias, como la simulación Monte Carlo, para evaluar la

dispersión probable del FS. Este tipo de análisis permite generar múltiples combinaciones de parámetros dentro de rangos definidos y estimar la probabilidad de obtener valores menores a 1.00. No obstante, su aplicación depende de la calidad de la información geotécnica disponible y no debe reemplazar el análisis determinístico principal mediante equilibrio límite (Yu et al., 2025; Rivera Chanca & Vicuña Ríos, 2024).

Entre las limitaciones señaladas en la literatura se encuentra la representación de los parámetros geotécnicos mediante valores promedio, pese a que sus propiedades pueden presentar variaciones naturales en campo. Esta simplificación puede influir en la interpretación del factor de seguridad, principalmente en taludes donde existen cambios en las características del material, zonas de menor resistencia o diferencias entre la cresta, la zona media y el pie. Por esta razón, resulta conveniente complementar el análisis determinístico con evaluaciones de sensibilidad que permitan identificar con mayor claridad la incidencia de cada parámetro sobre la estabilidad del talud (Corominas et al., 2014; Phoon & Ching, 2015).

Uno de los aspectos relevantes en el análisis pseudoestático es la selección del coeficiente sísmico horizontal kh. Este coeficiente permite representar de forma simplificada la acción sísmica sobre la masa potencialmente inestable; sin embargo, no existe un único valor aplicable a todos los casos, debido a que su selección depende de la amenaza sísmica, las condiciones geotécnicas del terreno, el tipo de obra y los criterios de seguridad adoptados. Por esta razón, la evaluación de distintos valores de kh permite analizar la sensibilidad del factor de seguridad frente a la variación de la solicitación sísmica considerada (Bray & Travasarou, 2011; Li et al., 2021).

En conjunto, el análisis de estabilidad integró tres componentes complementarios: el modelamiento bidimensional mediante Slide V6.004, el análisis determinístico de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria mediante ModelRisk. Esta última permitió caracterizar la distribución simulada del factor de seguridad y evaluar la sensibilidad estadística de la respuesta mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Los resultados fueron interpretados dentro de los rangos y distribuciones definidos para los escenarios considerados.

2.2.5. Métodos predominantes y limitaciones identificadas

En la literatura geotécnica, los métodos de equilibrio límite mantienen una amplia aplicación en el análisis de estabilidad de taludes, debido a que permiten calcular el factor

de seguridad bajo diferentes condiciones geométricas y resistentes. Su utilidad en la práctica de la Ingeniería Civil radica en la posibilidad de evaluar taludes naturales y conformados incorporando parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario, la geometría del talud y las solicitaciones actuantes (Duncan et al., 2014).

El análisis bidimensional constituye una aproximación aplicable cuando las condiciones del talud pueden representarse mediante una sección transversal representativa. Sobre dicha sección es posible determinar los factores de seguridad correspondientes a condiciones estáticas y pseudoestáticas y comparar la respuesta entre los escenarios evaluados. Sin embargo, este tipo de análisis presenta limitaciones ante variaciones laterales importantes, geometrías complejas o condiciones geológicas que requieran una representación tridimensional más detallada (Wu et al., 2024).

La elección de los valores de los parámetros geotécnicos de entrada constituye una de las limitaciones más importantes de este tipo de evaluaciones. La adopción de valores promedios o representativos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario limita la facultad del modelo para retratar la heterogeneidad del terreno. La variabilidad natural del terreno modifica el factor de seguridad calculado, y esto tiende a ser particularmente relevante cuando se observan diferencias geotécnicas entre sectores de un mismo talud (Corominas et al., 2014; Phoon & Ching, 2015).

El análisis pseudoestático también presenta restricciones, ya que aproxima la acción sísmica mediante una fuerza equivalente definida a partir del coeficiente sísmico horizontal. Aunque facilita la evaluación de estabilidad frente a solicitaciones sísmicas, no reproduce íntegramente la respuesta dinámica del suelo durante un sismo. Por tanto, sus resultados deben interpretarse dentro de este alcance y no reemplazan los análisis dinámicos cuando las condiciones del estudio exigen una evaluación más detallada (Bray & Travasarou, 2011).

En los taludes urbanos próximos a cauces fluviales pueden presentarse condiciones particulares asociadas a las características geotécnicas del terreno, la geometría del relieve y las modificaciones derivadas de la ocupación urbana. Asimismo, la erosión de las márgenes, las variaciones del contenido de humedad, los cambios en las cargas superficiales y las modificaciones de la geometría pueden alterar las condiciones de estabilidad. Por ello, la caracterización de la variabilidad geotécnica y la comparación de los factores de seguridad entre secciones y escenarios resultan necesarias para desarrollar una evaluación representativa del talud.

2.2.6. Vacío del conocimiento

La revisión del estado del arte deja en claro que se ha realizado un amplio trabajo sobre el análisis de la estabilidad de taludes mediante métodos de equilibrio límite, modelos bidimensionales y estudios pseudoestáticos. Los trabajos revisados se han centrado especialmente en taludes de carreteras, operaciones mineras, presas de tierra y pendientes naturales. En cambio, los taludes urbanos situados próximos a cauces fluviales deben ser objeto de estudios que incorporen las condiciones propias de su localización, así como de su proximidad a viviendas e infraestructura urbana (Corominas et al., 2014).

También se identificaron estudios que determinaron el FS a partir de parámetros geotécnicos representativos, sin evaluar de forma individual la incidencia de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario. Esta limitación dificulta reconocer qué parámetros producen las mayores variaciones del factor de seguridad y cuáles son las secciones más sensibles a los cambios en las propiedades del suelo (Phoon & Ching, 2015; Zeng et al., 2024).

Los análisis estáticos y pseudoestáticos aparecen también de forma separada, sin realizarse la comparación explícita entre ambas condiciones. Esta separación dificulta cuantificar de manera directa cuánto disminuye el FS como consecuencia de la acción sísmica y cómo la variación de los parámetros geotécnicos puede influir en dicha reducción (Kramer, 1996; Li et al., 2021).

La actividad sísmica y la ocupación constructiva de quebradas, taludes y márgenes fluviales en el Perú reafirman la necesidad de evaluar la estabilidad de los taludes. En el barrio La Recoleta, ubicado en la margen del río Chili, Arequipa, dicha evaluación implica analizar cómo la variación de los parámetros geotécnicos afecta a los FS de las secciones representativas del talud tanto en condición estática como en pseudoestática.

El vacío de conocimiento abordado por la investigación se relaciona con la necesidad de determinar cómo la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario influye en los factores de seguridad estático y pseudoestático de los taludes urbanos ribereños del barrio La Recoleta. Para ello, el estudio integra el análisis determinístico mediante Slide V6.004, el análisis de sensibilidad de los parámetros geotécnicos y, de manera complementaria, la simulación Monte Carlo para evaluar la distribución simulada del FS y la sensibilidad estadística de la respuesta dentro de los rangos y distribuciones definidos para cada escenario.

2.2.7. Matriz de síntesis del estado del arte

Con la finalidad de sintetizar las principales fuentes revisadas y evidenciar su contribución al desarrollo de la investigación, se presenta una matriz que integra literatura indexada, literatura gris y documentos nacionales. La matriz permite identificar el enfoque de cada fuente, su principal aporte y la relación directa con la evaluación de la variabilidad geotécnica y la estabilidad de los taludes estudiados.

Tabla 1

Matriz de síntesis del estado del arte

Categoría de fuente	Autor / año	Documento o estudio	Enfoque / metodología	Aporte principal	Relación directa con la tesis	Fuente / DOI / repositorio
Literatura indexada	Yang et al. (2023)	Slope Stability Prediction Method Based on Intelligent Optimization and Machine Learning Algorithms	Modelo predictivo de estabilidad mediante algoritmos de aprendizaje automático. Consideró 117 casos de taludes y variables como γ, c, φ, presión de poros, ángulo y altura del talud.	Identificó a la cohesión como una de las variables de mayor influencia en la clasificación de estabilidad.	Sustenta la selección de c, φ y γ como parámetros relevantes y la necesidad de evaluar su influencia sobre el factor de seguridad.	https://doi.org/10.3390/su15021169
Literatura indexada	Wu et al. (2024)	Comparing 2D and 3D Slope Stability in Spatially Variable Soils Using Random Finite-Element Method	Comparación probabilística 2D y 3D mediante RFEM, incorporando variabilidad espacial del suelo y simulaciones Monte Carlo.	Mostró una fuerte relación entre resultados 2D y 3D, pero también evidenció que el análisis 2D simplifica las características reales de falla.	Respalda el uso del análisis bidimensional como herramienta práctica, reconociendo explícitamente sus limitaciones frente a un comportamiento tridimensional.	https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106324
Literatura indexada	Zhang et al. (2024)	Effect of Structural Characteristics on the Stability of Multi-Weak Rock Slopes Considering the Spatial Variability of Geotechnical Parameters	Modelos de taludes con estratos débiles, campos aleatorios y variabilidad espacial de parámetros resistentes y geométricos.	Demostró que la variación de propiedades geotécnicas y características estructurales modifica el factor de seguridad y el mecanismo de falla.	Apoya la diferenciación entre cresta, zona media y pie, evitando representar el talud con un único conjunto uniforme de parámetros.	https://doi.org/10.1038/s41598-024-82296-9
Literatura indexada	Yu et al. (2025)	Probabilistic Slope Stability Analysis on Marine Clay Seabed Considering Spatial Variability of Soil Parameters	Integró equilibrio límite, variabilidad espacial mediante campos aleatorios y simulación Monte Carlo.	Evidenció que ignorar la variabilidad de parámetros puede distorsionar la evaluación de estabilidad y que el enfoque probabilístico complementa al determinístico.	Sustenta el uso de Monte Carlo como análisis complementario para interpretar la dispersión del factor de seguridad, sin reemplazar el cálculo principal en Slide.	https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1545900
Literatura indexada	Zeng et al. (2024)	A Case Study on Soil Slope Landslide Failure and Parameter Analysis of Influencing Factors for Safety Factor Based on Strength Reduction Method and Orthogonal Experimental Design	Análisis numérico con método de reducción de resistencia y diseño experimental ortogonal para estudiar altura, pendiente, c, φ y γ.	El FS aumentó al incrementarse c y φ, mientras que disminuyó al aumentar γ; cuantificó la respuesta del FS frente a cambios paramétricos.	Respalda directamente el análisis de sensibilidad de c, φ y γ desarrollado en la tesis.	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300586
Literatura indexada	Sengani y Allopi (2022)	Accuracy of Two-Dimensional Limit Equilibrium Methods in Predicting Stability of Homogenous Road-Cut Slopes	Comparación de métodos de equilibrio límite bidimensional aplicados a taludes homogéneos.	Evidenció que los resultados pueden variar según el método y las hipótesis de equilibrio empleadas.	Sustenta la utilización de métodos de equilibrio límite y la elección de un método uniforme de referencia para los resultados finales.	https://doi.org/10.3390/su14073872

Categoría de fuente	Autor / año	Documento o estudio	Enfoque / metodología	Aporte principal	Relación directa con la tesis	Fuente / DOI / repositorio
Literatura indexada	Rotaru et al. (2022)	Sustainable Slope Stability Analysis: A Critical Study on Methods	Revisión y comparación crítica de métodos de estabilidad de taludes, incluyendo formulaciones de equilibrio límite.	Expone alcances y diferencias entre métodos de cálculo del factor de seguridad y la necesidad de seleccionar el procedimiento conforme al problema analizado.	Aporta al sustento del análisis bidimensional y del uso del método de Spencer dentro del modelamiento de estabilidad.	https://doi.org/10.3390/su14148847
Literatura indexada	Li et al. (2021)	The Effects of Seismic Coefficient Uncertainty on Pseudo-Static Slope Stability: A Probabilistic Sensitivity Analysis	Análisis probabilístico y de sensibilidad del coeficiente sísmico horizontal y parámetros geotécnicos en estabilidad pseudoestática.	Mostró que la variación del coeficiente sísmico modifica la respuesta pseudoestática del talud.	Sustenta la incorporación de kh en el análisis de sensibilidad y la comparación de escenarios pseudoestáticos.	https://doi.org/10.3390/su13158647
Literatura indexada	Liu et al. (2026)	Parametric assessment of rainfall-related slope stability through SRM modeling and orthogonal experimental design: insights from the Zhuquedong slope, China	Modelamiento numérico de estabilidad mediante reducción de resistencia y diseño experimental ortogonal. Complementariamente, desarrolló un análisis de sensibilidad modificando individualmente los parámetros principales en ±10 % respecto del valor base, manteniendo constantes los demás parámetros.	Evidenció diferencias en la sensibilidad del factor de seguridad frente a los parámetros evaluados y utilizó la perturbación individual como comprobación cualitativa de consistencia del modelo, diferenciándola de una evaluación formal de incertidumbre.	Respalda el procedimiento de sensibilidad local empleado en la tesis, basado en modificar un parámetro a la vez alrededor de su valor base mientras los demás permanecen constantes, interpretando dichas perturbaciones como escenarios de sensibilidad y no como variabilidad espacial medida.	https://doi.org/10.1038/s41598-026-43289-y
Literatura indexada	Hammouti et al. (2026)	Transparent Python Framework for c-φ Reduction Slope Stability Analysis: Implementation and Validation	Análisis de estabilidad mediante el método de reducción c-φ acoplado al método de elementos finitos. Incorporó un análisis de sensibilidad de parámetros utilizando una variación de ±20 %.	El análisis de sensibilidad mostró una elevada respuesta del factor de seguridad frente a la cohesión y al ángulo de fricción interna; la Tabla 3 del estudio evalúa explícitamente los parámetros mediante una variación de ±20 %.	Constituye un antecedente metodológico directo del empleo de una perturbación controlada de ±20 % para evaluar sensibilidad paramétrica en estabilidad de taludes, respaldando el rango exploratorio adoptado en la presente investigación sin interpretarlo como variabilidad espacial real del terreno.	https://doi.org/10.13189/cea.2026.140113
Literatura gris	Garcés Gálvez (2023)	Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes	Tesis de pregrado. Modelamiento 2D en Slide V6.0; Spencer y Morgenstern-Price; métodos probabilísticos LHS y FOSM.	Determinó que c y φ fueron parámetros de alta influencia y que el análisis probabilístico aporta información complementaria al FS determinístico.	Es uno de los antecedentes nacionales más cercanos por el uso de Slide, equilibrio límite, parámetros variables y evaluación probabilística.	https://hdl.handle.net/11042/6566
Literatura gris	Durand Salas y Ramos Arias (2022)	Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad de taludes en suelos arenosos del sector Lomo de Corvina – Villa El Salvador	Tesis de pregrado. Comparó análisis determinístico y probabilístico mediante Slide en tres secciones; consideró c, φ y peso específico.	Concluyó que el análisis probabilístico permite incorporar la incertidumbre y complementar la interpretación del factor de seguridad determinístico.	Se relaciona con la tesis por el uso de Slide, varias secciones representativas y un análisis probabilístico complementario.	https://hdl.handle.net/20.500.14138/5893

Categoría de fuente	Autor / año	Documento o estudio	Enfoque / metodología	Aporte principal	Relación directa con la tesis	Fuente / DOI / repositorio
Literatura gris	Layme Anchapuri (2022)	Análisis comparativo de la estabilidad de taludes naturales a través de métodos de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas en Caballuni, Juncal-Puno, 2022	Tesis de pregrado. Comparó factores de seguridad mediante métodos de equilibrio límite bajo escenarios estáticos y pseudoestáticos.	Los FS disminuyeron al incorporar la acción sísmica simplificada, llegando varios resultados pseudoestáticos por debajo de la unidad.	Respalda la comparación directa entre condición estática y pseudoestática y el efecto desfavorable de la acción sísmica sobre el FS.	https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18529
Literatura gris	Rivera Chanca y Vicuña Ríos (2024)	Análisis probabilístico aplicado a la estabilidad de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del Mar	Tesis de pregrado orientada al análisis probabilístico de estabilidad de taludes en un entorno urbano costero.	Aporta un antecedente peruano de incorporación de incertidumbre en la evaluación de estabilidad.	Complementa el marco nacional sobre análisis probabilístico aplicado a taludes urbanos.	https://hdl.handle.net/20.500.12404/26894
Documento nacional	CENEPRED (2025)	Escenarios de riesgo por lluvias para el periodo abril–junio del 2025	Documento técnico nacional de evaluación de exposición frente a deslizamientos, flujos de detritos y otros movimientos en masa.	Cuantifica población, viviendas e infraestructura expuestas a riesgo muy alto por movimientos en masa en el Perú.	Sustenta el contexto nacional del problema y la relevancia de evaluar taludes en zonas urbanas expuestas.	https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/18701
Documento nacional	Rivera Porras y Cueva Sandoval (2017) - INGEMMET	Informe Técnico N.° A6761: Inspección geológica de la margen izquierda del río Chili, sector Parque Ecológico	Inspección geológica y evaluación de peligros en un sector urbano de la margen izquierda del río Chili.	Identifica condiciones de peligro geológico y recomendaciones de evaluación y prevención en un entorno directamente vinculado al río Chili.	Aporta sustento regional-local para justificar la necesidad de evaluar sectores urbanos ubicados en las márgenes del río Chili.	https://hdl.handle.net/20.500.12544/812
Documento nacional	Vela Valdez y Soncco Calsina (2018) - INGEMMET	Informe Técnico N.° A6846: Peligros geológicos en zonas de exploración de laderas en la cuenca del valle del río Chili, sector Alto Cayma, Arequipa	Evaluación de peligros geológicos en laderas de la cuenca del valle del río Chili.	Describe condiciones geológicas y peligros que justifican evaluaciones específicas de estabilidad en las laderas del valle.	Refuerza el contexto geológico regional de Arequipa y la pertinencia de analizar taludes próximos al río Chili.	https://hdl.handle.net/20.500.12544/1959
Documento nacional	MVCS (2018) - Norma E.030	Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones	Norma nacional para criterios de diseño sismorresistente y zonificación sísmica.	Proporciona la referencia del parámetro de zonificación sísmica utilizado como parte del sustento del escenario pseudoestático.	Sustenta el contexto sísmico del estudio. La tesis no atribuye a la E.030 la prescripción directa de kh = 0.175.	https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/211900-355-2018-vivienda
Documento nacional	MVCS (2018) - Norma E.050	Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones	Norma nacional para investigación geotécnica, exploración, muestreo y caracterización de suelos.	Aporta criterios técnicos para el reconocimiento geotécnico, la ejecución de calicatas y la caracterización del suelo.	Sustenta procedimientos de exploración y ensayos considerados durante la caracterización geotécnica.	https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/222983-406-2018-vivienda

Categoría de fuente	Autor / año	Documento o estudio	Enfoque / metodología	Aporte principal	Relación directa con la tesis	Fuente / DOI / repositorio
Documento nacional	MVCS (2012) - Norma CE.020	Norma Técnica CE.020: Estabilización de Suelos y Taludes del Reglamento Nacional de Edificaciones	Norma nacional aplicada a criterios de evaluación y estabilización de suelos y taludes.	Proporciona criterios técnicos de referencia para interpretar la condición de estabilidad y los factores de seguridad.	Se emplea como referencia técnica para contrastar los FS obtenidos en condición estática y sísmica.	https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne

Nota. La matriz organiza las fuentes que sustentaron los componentes conceptuales, metodológicos, contextuales y normativos de la investigación. La categoría «literatura indexada» corresponde a artículos científicos publicados en revistas científicas indexadas; la categoría «literatura gris» corresponde, principalmente, a tesis universitarias; los «documentos nacionales» responden a informes técnicos y a la normativa peruana que fundamentaron la descripción del área de estudio, la exploración geotécnica y la interpretación de las condiciones de estabilidad.

La literatura indexada establece la base sobre los métodos de equilibrio límite, la variabilidad geotécnica, el modelamiento bidimensional, la sensibilidad de los parámetros y el análisis probabilístico. La literatura gris comprende experiencias de aplicación de Slide desarrolladas en investigaciones nacionales, así como comparaciones entre análisis determinísticos y probabilísticos. La documentación nacional sustenta la caracterización de los peligros geológicos, la investigación del terreno, la incorporación de la acción sísmica y los criterios técnicos del análisis.

2.3. Marco teórico

El marco teórico desarrolla los fundamentos relacionados con la estabilidad de taludes, la resistencia al corte del suelo, el criterio de Mohr-Coulomb, los métodos de equilibrio límite, el análisis pseudoestático, la variabilidad geotécnica y el análisis de sensibilidad. Estos conceptos sustentan el procedimiento empleado para evaluar la influencia de la variabilidad geotécnica sobre los factores de seguridad obtenidos bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas en los taludes del barrio La Recoleta.

2.3.1. Estabilidad de taludes

Representa un área fundamental dentro de la ingeniería geotécnica, ya que permite analizar la capacidad de una masa de suelo o roca para conservar una condición de equilibrio frente a las solicitaciones que actúan sobre ella. Un talud se mantiene estable cuando las fuerzas resistentes son mayores que las fuerzas que tienden a producir el desplazamiento, originadas por el peso propio del terreno, las cargas externas, la presencia de agua y, en zonas sísmicas, las acciones de inercia. Cuando esta condición de equilibrio se altera, pueden generarse deslizamientos capaces de afectar la seguridad de la población y de las obras de infraestructura (Duncan et al., 2014).

Desde el punto de vista geotécnico, un talud corresponde a una superficie inclinada, natural o artificial, cuya estabilidad depende de la geometría del terreno, las propiedades mecánicas del suelo o roca y las condiciones hidráulicas existentes. Los taludes naturales se originan por procesos geológicos, mientras que los artificiales son producto de excavaciones o rellenos ejecutados durante la construcción de obras civiles. En ambos casos, factores como la meteorización, la erosión, las precipitaciones y la actividad sísmica pueden modificar las condiciones de estabilidad del terreno (Abramson et al., 2002).

Se evalúa a partir del equilibrio entre la resistencia disponible del suelo y las solicitaciones que favorecen el deslizamiento. La resistencia al corte depende de la cohesión, el ángulo de fricción interna y los esfuerzos efectivos, mientras que las solicitaciones incluyen el peso propio del terreno, las sobrecargas y las acciones sísmicas. La presión de poros también condiciona la estabilidad al modificar los esfuerzos efectivos y, por tanto, la resistencia al corte. Esta condición se cuantifica mediante el FS, que expresa la relación entre la resistencia disponible y la requerida para mantener el

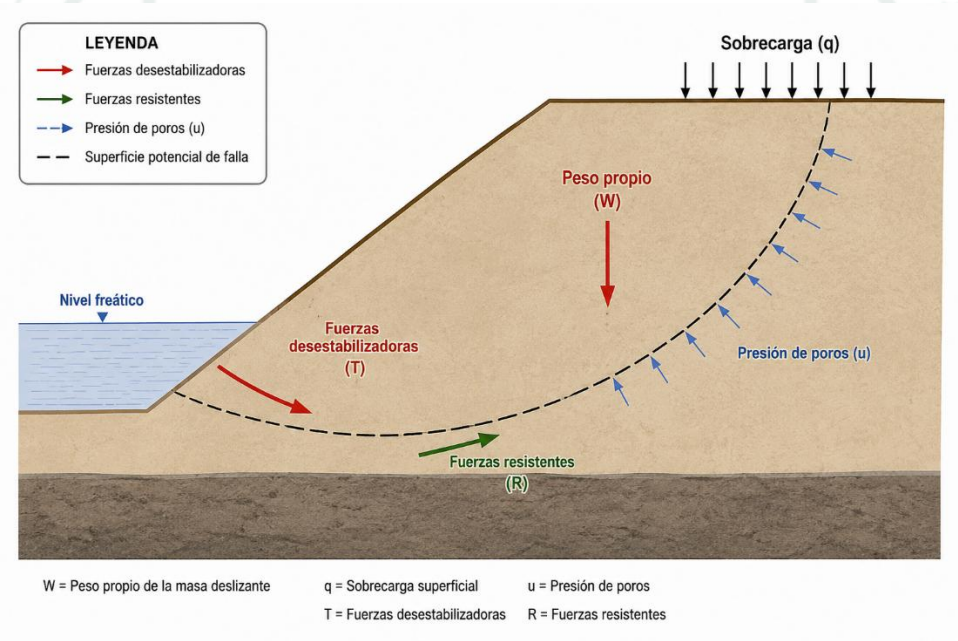
equilibrio (Duncan et al., 2014).

$$FS = \frac{Fuerzas\ resistentes}{Fuerzas\ actuantes}$$

Desde el punto de vista del equilibrio límite, un valor FS > 1.00 indica que la resistencia disponible supera a la requerida para alcanzar el equilibrio límite; FS = 1.00 representa la condición de equilibrio límite y FS<1.00 indica insuficiencia de resistencia dentro del modelo. Sin embargo, un valor superior a la unidad no implica por sí solo el cumplimiento de un criterio aceptable de estabilidad, ya que este debe contrastarse con el factor de seguridad mínimo establecido por la normativa o criterio técnico aplicable.

Figura 5

Esquema general de las fuerzas actuantes y resistentes en un talud.



Nota. La figura representa el equilibrio entre las fuerzas resistentes asociadas a la resistencia al corte del suelo y las fuerzas desestabilizadoras generadas por el peso propio, las cargas externas y la acción del agua sobre una superficie potencial de falla. Adaptado de Duncan et al. (2014).

La estabilidad del talud depende de factores geológicos, geotécnicos, hidráulicos y geométricos; la litología, el grado de alteración, la presencia de discontinuidades, la presión de poro, el nivel freático y la configuración del talud influyen directamente en su condición de estabilidad. Los deslizamientos se clasifican en rotacionales, traslacionales o compuestos en función de la morfología de la superficie de falla, clasificación que condicionará de modo directo la elección del método analítico (Hungr et al., 2014).

En la actualidad, los métodos de equilibrio límite, como Bishop, Janbu, Spencer y Morgenstern–Price, constituyen procedimientos ampliamente utilizados para evaluar la estabilidad de taludes, debido a que permiten calcular el factor de seguridad considerando diferentes geometrías y condiciones de carga. Estos métodos representan la base del análisis desarrollado en la presente investigación, orientada a evaluar la estabilidad bidimensional de los taludes del barrio La Recoleta, ubicado en la margen del río Chili, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014).

2.3.2. Resistencia al corte del suelo según Mohr-Coulomb

La resistencia al corte es una propiedad fundamental respecto al análisis de la estabilidad de los taludes, ya que representa la resistencia que tiene el terreno a los esfuerzos que pueden provocar una superficie de falla. Depende significativamente de la cohesión, el ángulo de fricción interna y la tensión normal efectiva que actúa sobre la superficie de deslizamiento (Duncan et al., 2014).

El criterio de Mohr-Coulomb es uno de los modelos más utilizados en ingeniería geotécnica para representar la resistencia al corte de los suelos. Este criterio establece que la resistencia al corte aumenta conforme se incrementa el esfuerzo normal efectivo, y se expresa mediante la siguiente ecuación (Duncan et al., 2014; Abramson et al., 2002):

$$\tau = C' + \sigma' tan\phi'$$

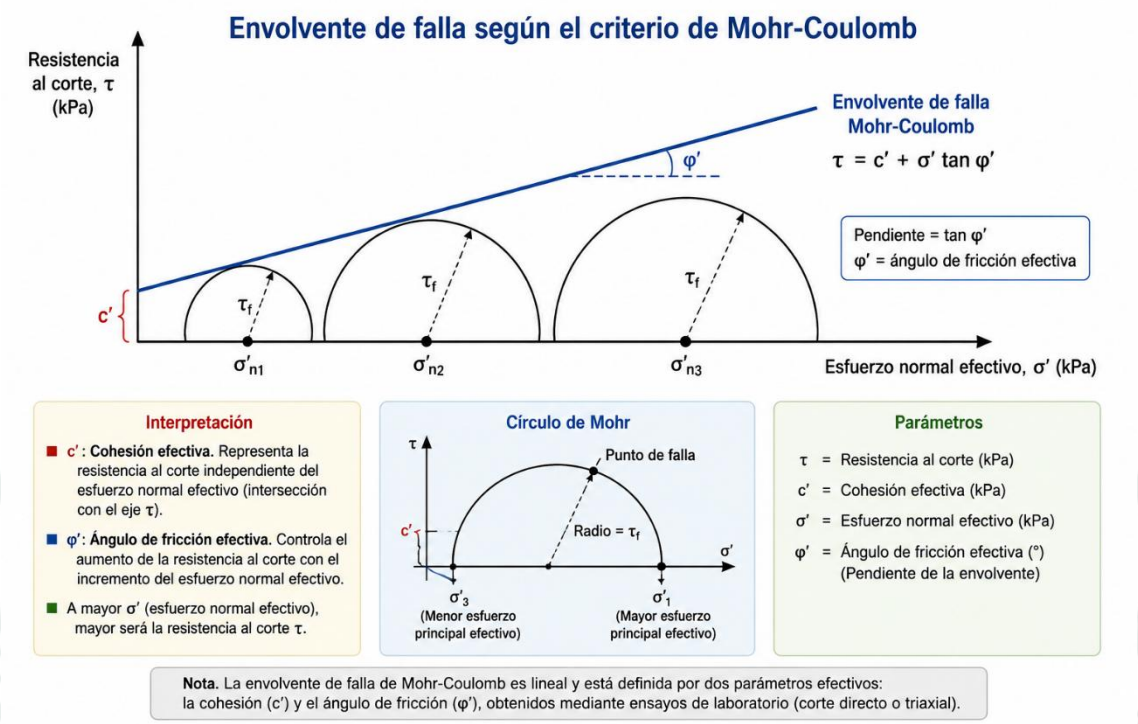
Donde:

- τ = resistencia al corte (kPa)
- c' = cohesión efectiva (kPa)
- σ' = esfuerzo normal efectivo (kPa)
- ϕ' = ángulo de fricción efectiva (°)

La cohesión representa la resistencia asociada a la unión o cementación entre partículas, mientras que el ángulo de fricción interna representa la resistencia generada por el rozamiento y engranamiento entre ellas. Por ello, un aumento de la cohesión o del ángulo de fricción interna incrementa la resistencia al corte y puede mejorar el FS del talud (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014).

Figura 6

Envolvente de falla según el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb.



Nota. La figura muestra la relación entre el esfuerzo normal efectivo (σ′) y la resistencia al corte (τ), donde la pendiente de la envolvente corresponde al ángulo de fricción efectiva (ϕ′) y la intersección con el eje vertical representa la cohesión efectiva (c′). Adaptado de Duncan et al. (2014)

Como se observa en la Figura 6, el criterio de Mohr-Coulomb permite interpretar la resistencia al corte del suelo mediante dos componentes principales: la cohesión y la fricción interna. Esta formulación es ampliamente utilizada en los métodos de equilibrio límite, debido a que permite calcular la resistencia disponible a lo largo de una superficie potencial de falla y compararla con las fuerzas actuantes del talud (Abramson et al., 2002; Duncan et al., 2014).

En el análisis de estabilidad de taludes, la variación de la cohesión y del ángulo de fricción interna puede modificar directamente el factor de seguridad. Una disminución de estos parámetros reduce la resistencia al corte disponible, mientras que su incremento mejora la capacidad resistente del suelo frente al deslizamiento. Por esta razón, ambos parámetros son considerados variables geotécnicas importantes en los análisis de sensibilidad y estabilidad (Yang et al., 2023; Zeng et al., 2024).

En la presente investigación, el criterio de Mohr-Coulomb se emplea como

fundamento para representar la resistencia al corte del suelo en el modelamiento desarrollado con Slide V6.004. Mediante este criterio se analiza la incidencia de la cohesión y del ángulo de fricción interna en los factores de seguridad obtenidos para las secciones representativas del talud, tanto en condición estática como pseudoestática.

2.3.3. Teoría de esfuerzos efectivos

Constituye uno de los fundamentos de la mecánica de suelos para explicar la resistencia y la deformación del terreno. Este principio establece que la respuesta del suelo depende principalmente de los esfuerzos efectivos transmitidos a través de su estructura de partículas sólidas, y no solo de los esfuerzos totales aplicados (Terzaghi et al., 1996).

Se define como la diferencia entre el esfuerzo total y la presión de poros. Esta relación permite comprender cómo la presencia de agua dentro de los vacíos del suelo puede reducir la resistencia al corte disponible. La expresión básica de la teoría de esfuerzos efectivos es la siguiente (Terzaghi et al., 1996):

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

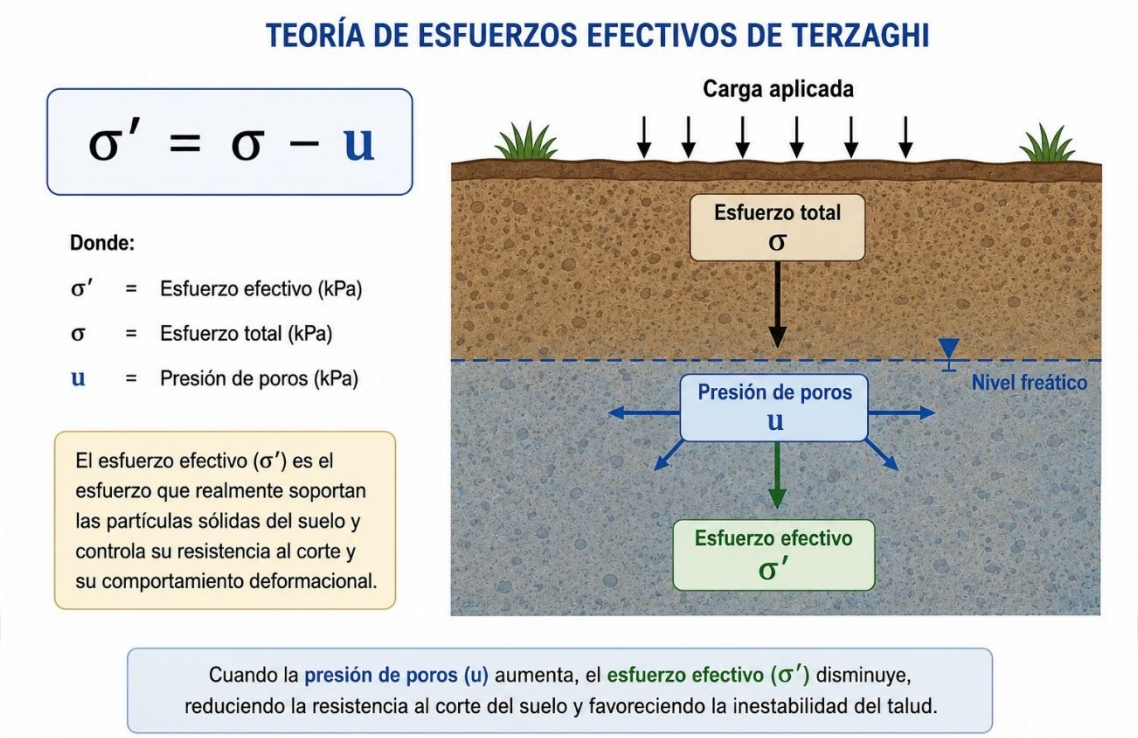
Donde:

- σ' = esfuerzo efectivo (kPa)
- σ = esfuerzo total (kPa)
- u = presión de poros (kPa)

Cuando la presión de poros aumenta, el esfuerzo efectivo disminuye y, como consecuencia, también puede reducirse la resistencia al corte del suelo. Este comportamiento resulta importante en la estabilidad de taludes, debido a que condiciones de saturación, infiltración o incremento del nivel freático pueden disminuir el factor de seguridad y favorecer procesos de inestabilidad (Duncan et al., 2014).

Figura 7

Esquema de la teoría de esfuerzos efectivos de Terzaghi.



Nota. El esfuerzo efectivo σ' corresponde a la diferencia entre el esfuerzo total σ y la presión de poros u, siendo el parámetro que controla la resistencia al corte y el comportamiento mecánico del suelo. Adaptado de Terzaghi et al. (1996).

La Figura 7 permite observar que el agua presente en los poros del suelo influye en la magnitud del esfuerzo efectivo. Por ello, en análisis geotécnicos donde existe evidencia de nivel freático, infiltración o presión intersticial, la presión de poros debe ser incorporada en el modelo de estabilidad para representar de manera más adecuada la condición resistente del talud (Terzaghi et al., 1996; Duncan et al., 2014).

En la presente investigación, la teoría de esfuerzos efectivos se considera como fundamento para comprender la influencia de la presión de poros sobre la resistencia al corte. Sin embargo, en el modelamiento realizado no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros, debido a que no se contó con medición piezométrica directa en campo. Esta decisión permite mantener coherencia con la información disponible y evita asumir condiciones hidráulicas no verificadas.

2.3.4. Cohesión efectiva (c')

La cohesión efectiva, representada como c′, corresponde a uno de los parámetros principales de resistencia al corte del suelo dentro del criterio de Mohr-Coulomb. Este parámetro expresa la resistencia asociada a la unión entre partículas, cementación,

compactación o fuerzas internas del material, y participa directamente en la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie potencial de falla (Duncan et al., 2014; Abramson et al., 2002).

En el análisis de estabilidad de taludes, la cohesión cumple un papel importante porque contribuye a incrementar la resistencia disponible frente al deslizamiento. Cuando la cohesión disminuye, el suelo presenta menor capacidad resistente, lo que puede generar una reducción del factor de seguridad. Por el contrario, un incremento de la cohesión puede mejorar la condición de estabilidad, siempre que los demás parámetros del modelo se mantengan constantes (Abramson et al., 2002).

Diversos estudios han señalado que la cohesión puede ser uno de los parámetros de mayor influencia en la estabilidad de taludes, especialmente en suelos donde la resistencia depende de la interacción entre partículas finas, humedad y estructura interna del material. Yang et al. (2023) identificaron que la cohesión tuvo una influencia importante en la clasificación de estabilidad de taludes, mientras que Zeng et al. (2024) evidenciaron que su variación puede modificar los factores de seguridad obtenidos en el análisis.

La cohesión constituye un parámetro geotécnico de entrada en el modelamiento implementado en Slide V6.004 y en el análisis de sensibilidad. Su variación permite evaluar de qué forma los cambios en la resistencia del suelo repercuten en los factores de seguridad estático y pseudoestático correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud.

2.3.5. Ángulo de fricción efectiva (φ')

El ángulo de fricción interna constituye uno de los parámetros mecánicos más importantes en la resistencia al corte del suelo. Representa la resistencia asociada al rozamiento y engranamiento entre las partículas sometidas a esfuerzos cortantes, y su magnitud depende de factores como la granulometría, la forma de las partículas, la densidad relativa, el grado de compactación y el confinamiento del material (Budhu, 2011).

Dentro del criterio de resistencia de Mohr-Coulomb, el ángulo de fricción efectiva controla el incremento de la resistencia al corte a medida que aumenta el esfuerzo normal efectivo. En suelos granulares, como arenas y gravas, este parámetro constituye el

principal mecanismo resistente, mientras que en suelos cohesivos actúa conjuntamente con la cohesión efectiva para determinar la capacidad resistente del material (Terzaghi et al., 1996).

Se determina a través de ensayos de laboratorio, particularmente el ensayo de corte directo y el ensayo triaxial drenado. En el análisis de estabilidad de taludes, un incremento de este parámetro aumenta la resistencia al corte y mejora el factor de seguridad, mientras que su reducción favorece el desarrollo de superficies potenciales de falla. Por ello, su adecuada determinación resulta indispensable para obtener análisis geotécnicos representativos (Duncan et al., 2014).

En la presente investigación, el ángulo de fricción interna se emplea como parámetro de entrada para el modelamiento en Slide V6.004 y para el análisis de sensibilidad. Su variación permite evaluar cómo los cambios en la resistencia friccional del suelo influyen en los factores de seguridad estático y pseudoestático de la cresta, zona media y pie del talud.

2.3.6. Peso unitario del suelo

Corresponde al peso del material por unidad de volumen y forma parte de los parámetros básicos de caracterización geotécnica. Su valor depende de la densidad, el contenido de humedad, el grado de compactación, la relación de vacíos y la condición de saturación. Se expresa habitualmente en kN/m^3 y permite calcular las cargas debidas al peso propio del terreno en los análisis de estabilidad (Das & Sobhan, 2018; Budhu, 2011).

El peso unitario puede expresarse de distintas formas según el estado del suelo. El peso unitario natural (γ) corresponde a la condición del terreno e incluye el contenido de agua existente al momento de la evaluación; el peso unitario seco (γd) considera únicamente el peso de las partículas sólidas respecto del volumen total; el peso unitario saturado (γsat) corresponde a la condición en la que los vacíos se encuentran ocupados por agua; y el peso unitario sumergido (γ') considera el efecto de flotación. La selección del valor utilizado en el modelamiento debe ser coherente con las condiciones hidráulicas y los supuestos adoptados en el análisis.

A diferencia de la cohesión y del ángulo de fricción interna, que intervienen directamente en la resistencia al corte, el peso unitario influye principalmente en las fuerzas actuantes dentro del talud. Su incremento aumenta el peso de la masa

potencialmente inestable y, por tanto, las fuerzas desestabilizadoras que actúan sobre la superficie de falla. En determinadas condiciones, un aumento de γ puede producir una disminución del factor de seguridad (Duncan et al., 2014; Abramson et al., 2002).

El peso unitario puede variar entre sectores de un mismo talud debido a diferencias en humedad, compactación, granulometría, estructura del suelo y condiciones de saturación. Esta variabilidad resulta relevante porque modifica la magnitud de las fuerzas actuantes y puede influir en la estabilidad global del talud. Estudios recientes han señalado que la variación de parámetros como el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción interna puede modificar los FS obtenidos en los análisis de estabilidad (Zeng et al., 2024).

Se emplea como parámetro de entrada en el modelamiento realizado mediante Slide V6.004. Asimismo, su variación se considera dentro del análisis de sensibilidad y de la simulación Monte Carlo complementaria, con la finalidad de evaluar cómo los cambios en γ influyen en los factores de seguridad estático y pseudoestático de la cresta, zona media y pie del talud.

2.3.7. Presión de poros

La presión de poros corresponde a la presión ejercida por el agua contenida en los vacíos del suelo. De acuerdo con el principio de esfuerzos efectivos de Terzaghi, el incremento de la presión de poros reduce el esfuerzo efectivo entre partículas y, por tanto, disminuye la resistencia al corte disponible del material. En consecuencia, la presencia de agua puede influir desfavorablemente en la estabilidad de un talud al reducir el factor de seguridad (Terzaghi et al., 1996; Duncan et al., 2014).

Puede variar por fluctuaciones del nivel freático, infiltración de agua de lluvia, saturación del suelo o cambios en el régimen de filtración del terreno. Estas condiciones influyen en la estabilidad del talud, especialmente en suelos finos, materiales meteorizados y sectores donde se acumula humedad. El incremento de la presión intersticial reduce el esfuerzo efectivo y, con ello, la resistencia al corte disponible para impedir el deslizamiento de la masa de suelo (Budhu, 2011).

En el análisis de estabilidad de taludes, la presión de poros interviene en la determinación de los esfuerzos efectivos y puede modificar el factor de seguridad obtenido mediante los métodos de equilibrio límite. La evaluación de las condiciones

hidráulicas del terreno resulta especialmente importante para representar adecuadamente el comportamiento del talud cuando existen indicios de superficie freática, infiltración o saturación del material (Duncan et al., 2014).

En la presente investigación, la presión de poros se considera como fundamento teórico para comprender su posible influencia sobre la estabilidad del talud. Sin embargo, en los modelos desarrollados en Slide V6.004 no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros, debido a que no se realizaron mediciones piezométricas directas en campo. Esta decisión mantiene la coherencia con la información disponible y evita asumir condiciones hidráulicas no verificadas.

2.3.8. Factor de seguridad (FS)

Representa el parámetro fundamental utilizado en los análisis de equilibrio límite para cuantificar la proporción entre la resistencia cortante disponible y las fuerzas actuantes que inducen el movimiento. Desde el punto de vista mecánico, FS = 1.00 representa la condición de equilibrio límite; un valor FS<1.00 indica que la resistencia disponible resulta insuficiente frente a las acciones movilizantes del modelo, mientras que un valor FS>1.00 indica que la resistencia disponible supera a la requerida para el equilibrio límite.

Sin embargo, que el FS sea superior a la unidad no implica, por sí solo, el cumplimiento de un criterio aceptable de estabilidad para una obra o evaluación geotécnica. La aceptabilidad debe contrastarse con el FS mínimo definido por la normativa o por el criterio técnico aplicable al caso analizado.

En la presente investigación se adoptó como referencia normativa la Norma Técnica CE.020, incorporada mediante el Decreto Supremo N.° 017-2012-VIVIENDA. Esta norma establece FS mínimos de 1.50 para solicitaciones estáticas y de 1.25 para solicitaciones sísmicas. Ambos valores se emplearon para contrastar los resultados determinísticos obtenidos en Slide V6.004 y evaluar su cumplimiento. De este modo, se distinguió entre la condición de equilibrio límite, correspondiente a FS = 1.00, y los márgenes de seguridad exigidos por la norma.

2.3.9. Métodos de equilibrio límite

Constituyen procedimientos ampliamente utilizados para evaluar la estabilidad de taludes, debido a que permiten calcular el FS mediante el equilibrio entre las fuerzas

resistentes y las fuerzas actuantes sobre una superficie potencial de falla. Estos métodos consideran que la masa de suelo se encuentra próxima a la condición de falla y analizan el equilibrio de fuerzas y momentos sin representar directamente el comportamiento tensión-deformación del material (Abramson et al., 2002).

Entre los procedimientos más utilizados se encuentra el método simplificado de Bishop, el cual se aplica principalmente a superficies potenciales de falla de geometría circular y satisface de manera predominante la condición de equilibrio de momentos. Su empleo es frecuente en el análisis de estabilidad de taludes debido a la relativa sencillez de su aplicación y a la consistencia de los resultados obtenidos cuando se evalúan mecanismos de falla circulares, por lo que se encuentra incorporado en diversos programas especializados de análisis geotécnico (Bishop, 1955; Duncan et al., 2014).

El método de Janbu permite analizar superficies de falla circulares y no circulares, satisfaciendo principalmente el equilibrio de fuerzas. Su aplicación resulta adecuada cuando la geometría del talud presenta irregularidades o cuando la superficie potencial de falla no puede representarse únicamente mediante un arco circular (Janbu, 1973).

Por su parte, los métodos de Spencer y Morgenstern-Price satisfacen simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos, por lo que se consideran procedimientos rigurosos dentro del análisis de estabilidad de taludes. Estos métodos permiten una representación más completa del equilibrio interno de la masa potencialmente inestable y suelen emplearse cuando se requiere una interpretación más precisa del factor de seguridad (Spencer, 1967; Morgenstern & Price, 1965; Duncan et al., 2014).

En la investigación, la estabilidad de los taludes fue evaluada mediante el software Slide V6.004, empleando el método de equilibrio límite de Spencer para la determinación de los FS. La elección de este método respondió a que permite satisfacer de manera simultánea las condiciones de equilibrio de fuerzas y de momentos. Su aplicación se mantuvo de forma uniforme en los análisis estáticos, pseudoestáticos y de sensibilidad. Además, los factores de seguridad calculados mediante Spencer constituyeron la base para la formulación del modelo de respuesta utilizado posteriormente en la simulación Monte Carlo complementaria.

2.3.10. Superficies de falla

Representan la trayectoria o zona potencial a lo largo de la cual puede producirse el desplazamiento de una masa de suelo o roca cuando la resistencia al corte es superada por las fuerzas actuantes. Su forma depende de las condiciones geológicas, geotécnicas, geométricas e hidráulicas del talud, así como del tipo de material y de los mecanismos de deformación que pueden desarrollarse durante el proceso de inestabilidad (Hungr et al., 2014).

En el análisis de estabilidad de taludes, las superficies potenciales de falla se clasifican principalmente en rotacionales, traslacionales y compuestas. Las rotacionales siguen una trayectoria aproximadamente circular y son frecuentes en suelos cohesivos o materiales relativamente homogéneos. Las traslacionales se desarrollan sobre superficies predominantemente planas, vinculadas con discontinuidades, estratos de baja resistencia o contactos entre materiales. Las compuestas combinan segmentos curvos y planos, por lo que configuran mecanismos de ruptura más complejos (Abramson et al., 2002).

La identificación de la superficie crítica constituye una etapa fundamental del análisis mediante métodos de equilibrio límite, debido a que el factor de seguridad se evalúa para distintas superficies potenciales de falla hasta determinar aquella que presenta el menor valor. Esta superficie se considera crítica porque representa la condición más desfavorable dentro del modelo geotécnico y de la geometría analizada. Programas especializados como Slide emplean procedimientos iterativos de búsqueda para identificar la superficie asociada al factor de seguridad mínimo.

El modelamiento bidimensional se realizó en Slide V6.004 considerando superficies de falla circulares, y los factores de seguridad fueron calculados mediante el método de Spencer. La identificación de las superficies críticas permitió obtener el FS estático y pseudoestático de las secciones representativas de cresta, zona media y pie del talud.

2.3.11. Análisis pseudoestático

Se trata de una técnica utilizada para estudiar la estabilidad de taludes bajo acción sísmica de una forma simplificada. A diferencia de un estudio dinámico, este método no reproduce todo el movimiento del terreno durante un sismo, sino que reproduce el efecto del movimiento del suelo de forma simplificada mediante fuerzas inerciales equivalentes

aplicadas sobre la masa potencialmente inestable. Su principal ventaja es que se puede usar como un método de equilibrio límite para determinar la reducción del FS ocasionada por la acción sísmica (Kramer, 1996).

En este tipo de análisis, la acción sísmica se representa mediante coeficientes sísmicos horizontal y vertical. El coeficiente horizontal, identificado como **kh**, genera una fuerza inercial horizontal que incrementa las fuerzas desestabilizadoras del talud. El coeficiente vertical, identificado como **kv**, representa la componente vertical de la aceleración sísmica; sin embargo, en muchos análisis geotécnicos se considera de menor efecto respecto al componente horizontal (Bray & Travasarou, 2011).

Las fuerzas pseudoestáticas se expresan mediante las siguientes relaciones:

$$F_h = k_h W$$

$$F_V = k_V W$$

Donde:

Fh = fuerza pseudoestática horizontal

Fv = fuerza pseudoestática vertical

W = peso de la masa potencialmente deslizante

kh = coeficiente sísmico horizontal

kv = coeficiente sísmico vertical

La incorporación de una fuerza pseudoestática horizontal tiende a disminuir el factor de seguridad, debido a que incrementa las acciones que favorecen el desplazamiento potencial de la masa de suelo. En ese sentido, el análisis pseudoestático permite comparar la respuesta del talud entre una condición estática y un escenario sísmico simplificado, lo cual resulta especialmente relevante en zonas con actividad sísmica como Arequipa (Kramer, 1996; Bray & Travasarou, 2011).

En la presente investigación, el análisis pseudoestático se empleó para evaluar la estabilidad de las secciones representativas del barrio La Recoleta ante una solicitación sísmica simplificada. Los factores de seguridad obtenidos fueron comparados con los correspondientes a la condición estática, permitiendo examinar la incidencia de la acción sísmica y de la variabilidad de los parámetros geotécnicos en la cresta, zona media y pie del talud.

2.3.12. Coeficientes sísmicos

Los coeficientes sísmicos son parámetros empleados en el análisis pseudoestático para representar de manera simplificada los efectos de la aceleración sísmica sobre una masa potencialmente inestable. Estos coeficientes permiten transformar la acción dinámica de un sismo en fuerzas inerciales equivalentes, las cuales pueden incorporarse en los métodos de equilibrio límite para evaluar la estabilidad de taludes bajo condición sísmica (Kramer, 1996).

El coeficiente sísmico horizontal, representado como kh, corresponde a una fracción de la aceleración de la gravedad y se aplica en dirección horizontal sobre el peso de la masa potencialmente deslizante. Su incorporación incrementa las fuerzas actuantes que favorecen el desplazamiento del talud, por lo que generalmente produce una reducción del factor de seguridad respecto a la condición estática (Bray & Travasarou, 2011).

El coeficiente sísmico vertical, representado como kv, corresponde a la componente vertical de la acción sísmica. Este coeficiente puede modificar el peso efectivo de la masa analizada; sin embargo, su influencia suele ser menor que la componente horizontal y, en muchos análisis pseudoestáticos, se considera igual a cero cuando no existe una justificación específica para incorporarlo. Esta simplificación permite centrar la evaluación en el efecto horizontal, que normalmente tiene mayor incidencia en la estabilidad del talud (Kramer, 1996).

La elección de los coeficientes sísmicos debe realizarse de manera cuidadosa, debido a que valores mayores de kh incrementan las fuerzas desestabilizadoras y reducen el factor de seguridad. Por ello, el análisis pseudoestático no debe interpretarse como una reproducción completa del comportamiento dinámico del talud, sino como una aproximación simplificada que permite comparar la estabilidad bajo una condición sísmica equivalente (Bray & Travasarou, 2011).

En la presente investigación, los coeficientes sísmicos se emplean para desarrollar el análisis pseudoestático de las secciones representativas de la cresta, zona media y pie del talud. Para mantener uniformidad en el modelamiento, se considera el coeficiente horizontal kh como variable de análisis en la condición pseudoestática, mientras que el coeficiente vertical kv se mantiene igual a cero.

2.3.13. Selección del coeficiente pseudoestático

Se consideró un coeficiente sísmico horizontal base de kh = 0.175 y un coeficiente sísmico vertical de kv = 0.00. El valor de kh fue adoptado como un parámetro referencial para el modelamiento, debido a que la investigación no dispuso de un estudio de peligro sísmico específico para el área de evaluación que permitiera definir directamente un coeficiente pseudoestático particular para el talud analizado.

Para establecer la condición sísmica de referencia se adoptó el factor de zona Z = 0.35 correspondiente a la ubicación del área de estudio, de acuerdo con la Norma Técnica E.030. Esta norma se utilizó únicamente como referencia de zonificación sísmica; por tanto, el valor kh = 0.175 no se interpreta como una prescripción directa de la E.030 para el talud evaluado.

A partir del factor de zona adoptado, el coeficiente pseudoestático se determinó mediante el siguiente criterio simplificado:

$$k_h = 0.50\, Z$$

Por tanto:

$$k_h = 0.50\,(0.35) = 0.175$$

Este criterio se adoptó tomando como referencia a Hynes-Griffin y Franklin (1984), quienes plantean el empleo de una fracción de la aceleración sísmica de referencia en evaluaciones pseudoestáticas. En la presente investigación, su aplicación se considera una aproximación de modelamiento y no un valor normativo específico para el sitio.

Los materiales del área fueron caracterizados geotécnicamente mediante SUCS; sin embargo, esta clasificación no equivale a una clasificación dinámica del perfil sísmico del sitio. La investigación no incluyó ensayos SPT, mediciones de velocidad de onda de corte Vs ni estudios geofísicos orientados a establecer un perfil sísmico específico. Por ello, no se incorporó un factor adicional de amplificación sísmica obtenido a partir de una caracterización dinámica del terreno.

El elemento analizado corresponde a un talud urbano ribereño próximo a infraestructura y zonas ocupadas; no obstante, no se empleó un factor de importancia estructural para modificar el coeficiente pseudoestático, debido a que la investigación evalúa la estabilidad del talud y no corresponde al diseño sismorresistente de una

edificación específica.

El coeficiente vertical se mantuvo en kv = 0.00 para todos los escenarios, con la finalidad de concentrar el análisis en la componente horizontal y mantener una condición uniforme de comparación entre las tres secciones evaluadas.

Debido al carácter referencial del coeficiente adoptado, se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar cómo su variación modificaba el factor de seguridad del talud. Para ello, se consideraron los siguientes valores de kh:

$$k_h = 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625, 0.350$$

En cada escenario se mantuvieron constantes la geometría y los demás parámetros del modelo, variando únicamente kh. Este procedimiento permitió evaluar la respuesta del factor de seguridad frente a diferentes niveles de solicitación sísmica horizontal simplificada y reducir la dependencia interpretativa de un único valor de kh.

De manera complementaria, en la simulación Monte Carlo pseudoestática se consideró kh mediante una distribución VosePERT con un valor mínimo de 0.000, un valor más probable de 0.175 y un valor máximo de 0.350. Esta evaluación complementaria permitió representar la incertidumbre asociada al coeficiente adoptado, sin interpretar kh = 0.175 como una medición sísmica específica del sitio.

2.3.14. Variabilidad geotécnica

Las propiedades físicas y mecánicas del suelo pueden presentar diferencias dentro de un mismo depósito, estrato o sector debido a factores como los procesos de formación geológica, la granulometría, el contenido de humedad, la densidad, la compactación, la cementación, la meteorización y el estado de saturación. En consecuencia, los parámetros geotécnicos pueden variar incluso dentro de una misma unidad de suelo, por lo que su representación mediante un único valor puede resultar limitada cuando se busca describir la heterogeneidad del terreno (Phoon & Kulhawy, 1999; Phoon & Ching, 2015).

En la caracterización geotécnica se reconocen tres fuentes principales de variabilidad e incertidumbre. La variabilidad inherente responde a la heterogeneidad natural del suelo. La incertidumbre de transformación surge al estimar parámetros mediante correlaciones o modelos a partir de los resultados de ensayo. Por su parte, la incertidumbre de medición se vincula con el muestreo, la instrumentación y los procedimientos experimentales. Estas fuentes contribuyen a explicar las diferencias entre

los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario obtenidos en una misma zona de estudio (Fenton & Griffiths, 2008).

En el análisis de estabilidad de taludes, la variabilidad geotécnica adquiere importancia porque los factores de seguridad dependen directamente de los parámetros resistentes y físicos del suelo. Cambios en la cohesión, el ángulo de fricción interna o el peso unitario pueden modificar la relación entre fuerzas resistentes y fuerzas actuantes, generando diferencias en la estabilidad calculada. Por ello, el uso de un único valor determinístico puede ser limitado cuando se busca comprender el comportamiento del talud frente a distintos escenarios geotécnicos (Phoon & Ching, 2015).

La variabilidad puede evaluarse mediante análisis de sensibilidad, métodos estadísticos o simulaciones probabilísticas que permitan observar la influencia de los parámetros de entrada sobre la respuesta del modelo. Estos procedimientos no reemplazan al análisis determinístico, sino que lo complementan, ya que permiten identificar qué variables tienen mayor incidencia en el factor de seguridad y qué tan vulnerable puede ser el talud frente a cambios en las propiedades del suelo (Fenton & Griffiths, 2008).

Diversos estudios han mostrado que las variaciones de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario modifican los FS de los taludes. Yang et al. (2023) señalaron la importancia de los parámetros de resistencia en la clasificación de la estabilidad, mientras que Zeng et al. (2024) resaltaron que el análisis de la variación de las propiedades geotécnicas permite comprender mejor la respuesta de los taludes ante distintas condiciones.

En la presente investigación, la variabilidad geotécnica se determinó mediante las diferencias entre los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario obtenidos para la cresta, la zona media y el pie del talud. Para la condición pseudoestática, se evaluó adicionalmente la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, adoptando un valor base de 0.175. Este coeficiente se consideró un parámetro sísmico de modelamiento, diferenciado de las propiedades geotécnicas del suelo, y permitió examinar la incidencia de la acción sísmica simplificada en los factores de seguridad.

2.3.15. Parámetros estadísticos

Los parámetros estadísticos permiten describir la tendencia central y la dispersión de un conjunto de datos. Entre los indicadores empleados se encuentran la media

aritmética, la mediana, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los valores mínimo y máximo y los percentiles. Su interpretación debe realizarse considerando el tamaño, origen y representatividad de los datos analizados.

En la presente investigación, los valores representativos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario empleados en el modelamiento corresponden a tres secciones diferenciadas del talud: cresta, zona media y pie. Debido al número limitado de determinaciones mecánicas independientes, estos tres conjuntos de parámetros no se tratan como una muestra estadística suficiente para inferir la variabilidad espacial general de todo el talud ni para establecer distribuciones poblacionales de c, φ o γ.

Por esta razón, no se emplea el coeficiente de variación calculado a partir de tres valores de resistencia como demostración concluyente de variabilidad espacial. La comparación entre las tres secciones se utiliza de manera descriptiva para reconocer diferencias entre los parámetros representativos, mientras que la influencia individual de cada parámetro sobre el factor de seguridad se evalúa mediante el análisis de sensibilidad, variando una sola variable a la vez y manteniendo constantes la geometría y los demás parámetros del modelo.

Los estadísticos de media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, mínimo, máximo y percentiles se emplean principalmente para describir las distribuciones del factor de seguridad generadas en la simulación Monte Carlo mediante ModelRisk. En este contexto, el factor de seguridad constituye una variable de salida del modelo y su coeficiente de variación representa únicamente la dispersión relativa de los resultados simulados dentro de cada escenario.

Asimismo, las distribuciones VosePERT utilizadas en la simulación Monte Carlo se consideran distribuciones de escenario construidas a partir de rangos controlados alrededor de los valores representativos adoptados. Debido a la disponibilidad limitada de ensayos mecánicos, no se interpretan como distribuciones probabilísticas calibradas estadísticamente para la población total del sector. En consecuencia, los resultados Monte Carlo tienen carácter complementario y exploratorio y se utilizan para reforzar la interpretación del análisis determinístico y de sensibilidad, sin sustituirlos.

Para evaluar la asociación entre los parámetros considerados en el análisis de sensibilidad y el FS se empleó adicionalmente el coeficiente de correlación por rangos de Spearman (ρs). Este coeficiente constituye una medida estadística no paramétrica que

permite determinar la dirección y el grado de asociación monotónica entre dos variables cuantitativas a partir del orden o rango de sus valores, sin requerir que los datos presenten una distribución normal (Mendivelso, 2022).

El coeficiente de Spearman presenta valores comprendidos entre −1 y +1. Los valores positivos indican una relación monotónica directa, es decir, que al aumentar una variable la otra tiende también a aumentar; mientras que los valores negativos representan una relación inversa, en la cual el incremento de una variable se asocia con la disminución de la otra. Un valor próximo a cero evidencia ausencia de una relación monotónica definida.

En la presente investigación, este coeficiente se utiliza como complemento estadístico del análisis de sensibilidad para evaluar la asociación entre la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el FS. En condición pseudoestática se incorpora además el coeficiente sísmico horizontal kh. Su aplicación se limita a los escenarios paramétricos modelados y no se interpreta como una inferencia estadística de la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

2.3.16. Análisis de sensibilidad

Constituye una herramienta empleada para determinar la incidencia que tienen las variaciones de los parámetros de entrada sobre la respuesta de un modelo. En ingeniería geotécnica, este procedimiento permite reconocer cuáles variables generan mayores cambios en el factor de seguridad y, en consecuencia, cuáles requieren una caracterización más rigurosa durante la evaluación de estabilidad de taludes (Saltelli et al., 2008).

En el análisis de estabilidad de taludes, la sensibilidad se evalúa mediante enfoques locales y globales. El enfoque local modifica un parámetro a la vez, mientras mantiene constantes los restantes, para determinar su incidencia en la respuesta del modelo. El enfoque global, en cambio, incorpora la variación simultánea de varios parámetros dentro de rangos definidos, lo que permite explorar distintas combinaciones y evaluar su influencia conjunta en los resultados (Saltelli et al., 2008; Fenton & Griffiths, 2008).

En el análisis de taludes, la evaluación de sensibilidad resulta relevante debido a que el factor de seguridad se encuentra condicionado por parámetros como la cohesión,

el ángulo de fricción interna, el peso unitario, la geometría del talud, las condiciones hidráulicas y la acción sísmica. La reducción de los parámetros resistentes puede disminuir el factor de seguridad; mientras que el incremento del peso unitario o del coeficiente sísmico horizontal puede aumentar las fuerzas actuantes y generar una condición menos favorable para la estabilidad (Duncan et al., 2014).

La sensibilidad se realizó mediante un enfoque paramétrico local, alterando por separado la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, manteniendo fijos los demás parámetros. Se aplicó este procedimiento sobre las secciones de la cresta, zona media y pie del talud. En los análisis pseudoestáticos se evaluó la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, considerando como valor base kh = 0.175. Este valor se obtuvo mediante el criterio simplificado kh = 0.50 × Z, considerando Z = 0.35 como factor de zona de referencia según la Norma Técnica E.030.

El análisis permitió comparar los FS calculados bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas e identificar la influencia individual de cada parámetro en la estabilidad bidimensional de las secciones evaluadas.

Los resultados de sensibilidad sirvieron, además, de base para la simulación Monte Carlo complementaria, en la que los parámetros variaron simultáneamente dentro de los rangos y las distribuciones de escenario establecidos. Con esta simulación se examinó la distribución del FS y se evaluó la sensibilidad estadística de la respuesta mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional.

2.3.17. Margen de seguridad

El margen de seguridad (MS) constituye un indicador complementario del factor de seguridad y expresa la diferencia algebraica entre el FS calculado y la condición de equilibrio límite, definida por FS = 1.00. Se determina mediante la siguiente expresión:

$$MS = FS - 1$$

Un valor MS<0 corresponde a un FS menor que la unidad y, por tanto, a una condición de insuficiencia de estabilidad dentro del modelo de equilibrio límite. Cuando MS = 0, el resultado coincide con el equilibrio límite FS = 1.00. Cuando MS>0, el factor de seguridad se encuentra por encima de la unidad; no obstante, un margen positivo no debe interpretarse automáticamente como cumplimiento de estabilidad normativa.

En esta investigación, el margen de seguridad se emplea únicamente para comparar la cercanía relativa de los resultados respecto de FS = 1.00. El cumplimiento técnico se evalúa por separado mediante los factores mínimos de referencia de la Norma Técnica CE.020: FS = 1.50 para solicitaciones estáticas y FS = 1.25 para solicitaciones sísmicas. De este modo, un resultado puede presentar MS positivo y, al mismo tiempo, no alcanzar el factor de seguridad mínimo normativo.

2.4. Marco legal

El presente estudio se sustenta en normas técnicas y documentos de referencia aplicables a la caracterización geotécnica, evaluación de estabilidad de taludes, análisis sismorresistente y gestión del riesgo de desastres. Estas disposiciones permiten establecer criterios mínimos para la investigación del suelo, la interpretación de sus propiedades físicas y mecánicas, y la consideración de condiciones sísmicas dentro del análisis de estabilidad.

2.4.1. Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones

Establece criterios para la ejecución de estudios geotécnicos, exploración del subsuelo, caracterización de propiedades del terreno y determinación de parámetros necesarios para el diseño de cimentaciones y estructuras relacionadas con el suelo. En la presente investigación, esta norma se considera como referencia general para sustentar la importancia de la caracterización geotécnica mediante exploraciones, ensayos de laboratorio y evaluación de parámetros resistentes (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2018b).

2.4.2. Reglamento Nacional de Edificaciones – Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente

La Norma Técnica E.030 establece criterios para incorporar la acción sísmica en el diseño sismorresistente de edificaciones y define la zonificación sísmica del territorio peruano. En el caso del área de estudio, esta norma permite identificar la zona sísmica correspondiente y su respectivo factor de zona Z, expresado como una fracción de la aceleración de la gravedad.

La Norma Técnica E.030 se utilizó en esta investigación únicamente como referencia para la zonificación sísmica del área de estudio. Para la zona sísmica 3 se adoptó el factor de zona Z = 0.35. A partir de este valor y mediante el criterio simplificado

kh = 0.50 × Z, se obtuvo un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 para el modelamiento pseudoestático. Este coeficiente no constituye una prescripción directa de la E.030 ni representa de manera completa la respuesta dinámica del terreno (MVCS, 2018a).

2.4.3. Ley N.° 29664 – Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)

Define lineamientos orientados a la prevención, reducción y control de riesgos derivados de fenómenos naturales o de actividades humanas. Su aplicación resulta pertinente para la presente investigación, debido a que los taludes ubicados en zonas urbanas o próximas a infraestructura pueden constituir condiciones de peligro geológico que requieren ser identificadas, evaluadas y consideradas dentro de las medidas de prevención correspondientes.

En ese sentido, el análisis de estabilidad de los taludes del barrio La Recoleta contribuye a la gestión del riesgo, ya que permite reconocer sectores con menor factor de seguridad y condiciones críticas frente a escenarios estáticos y pseudoestáticos (Congreso de la República del Perú, 2011).

2.4.4. Norma ISO 14688-1:2017

Establece criterios para la identificación y descripción de suelos con fines geotécnicos. Su aplicación permite uniformizar la descripción de materiales, considerando características relevantes para la interpretación geotécnica del terreno. En la presente investigación, esta norma se considera como referencia para la identificación y descripción de los materiales observados en las calicatas, contribuyendo a una descripción ordenada y técnicamente uniforme de los suelos presentes en la zona de estudio (International Organization for Standardization [ISO], 2017).

2.4.5. Normas ASTM empleadas en la investigación

Constituyen procedimientos técnicos utilizados para la ejecución de ensayos de laboratorio y clasificación de suelos. En la presente investigación, se consideran las normas relacionadas con la clasificación SUCS, límites de Atterberg, contenido de humedad, determinación de propiedades físicas y ensayo de corte directo bajo ASTM D3080/D3080M, según los procedimientos aplicados en laboratorio.

Estas normas sustentaron los procedimientos de ensayo empleados para determinar la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo. Los

parámetros obtenidos se incorporaron como datos de entrada en los modelos de estabilidad desarrollados en Slide V6.004.

2.4.6. Publicaciones técnicas de INGEMMET

Aportan información técnica para identificar y evaluar peligros geológicos y procesos de movimientos en masa. En esta investigación se consultaron informes de distintos sectores de la cuenca del río Chili, por su proximidad al área de estudio y su contribución a la descripción del contexto geológico y geomorfológico. Estos documentos se emplearon como antecedentes técnicos para caracterizar el entorno, sin atribuirles carácter normativo obligatorio en el modelamiento de estabilidad.

2.4.7. Norma Técnica CE.020: Estabilización de Suelos y Taludes

Establece criterios técnicos mínimos para la evaluación y estabilización de taludes en proyectos de ingeniería civil. Para la verificación de la estabilidad, la norma considera el análisis frente a condiciones estáticas y sísmicas, adoptando factores de seguridad mínimos de 1.50 y 1.25, respectivamente (MVCS, 2012). En la presente investigación, estos valores se utilizaron como referencias normativas para interpretar los FS obtenidos mediante el modelamiento bidimensional. Esta comparación no representa una verificación integral del cumplimiento de la Norma CE.020, debido a que el coeficiente pseudoestático empleado en el estudio fue adoptado con carácter referencial y no fue determinado a partir de un estudio específico de peligro sísmico para el área evaluada.

2.5. Definición de términos básicos

2.5.1. Talud

Un talud es una superficie inclinada natural o artificial conformada por suelo, roca o una combinación de ambos materiales. Su estabilidad depende de la geometría, las propiedades geotécnicas del material, las condiciones hidráulicas, las cargas externas y las solicitaciones sísmicas. En la presente investigación se analizaron secciones representativas del talud ubicado en el barrio La Recoleta, margen del río Chili, Arequipa.

2.5.2. Estabilidad de taludes

Se refiere a la capacidad de una masa de suelo para mantener una condición de equilibrio frente a las acciones que tienden a producir su desplazamiento. En un análisis por equilibrio límite, FS = 1.00 representa la condición de equilibrio límite, FS<1.00 indica insuficiencia de resistencia dentro del modelo y FS>1.00 indica que la resistencia

disponible supera a la requerida para alcanzar dicho equilibrio. Sin embargo, un factor de seguridad superior a la unidad no implica por sí solo el cumplimiento de un criterio aceptable de estabilidad, ya que su interpretación debe contrastarse con el FS mínimo establecido por el criterio técnico o normativo aplicable (Duncan et al., 2014; Abramson et al., 2002).

2.5.3. Variabilidad geotécnica

La variabilidad geotécnica corresponde a las diferencias que pueden presentar las propiedades físicas y mecánicas del suelo dentro de un mismo sector, asociadas a factores como la formación geológica, el contenido de humedad, la compactación, la granulometría, la densidad, la cementación y la meteorización (Fenton & Griffiths, 2008; Phoon & Ching, 2015). En la presente investigación, su evaluación se centra en las diferencias observadas en los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario de las secciones representativas.

2.5.4. Cohesión

Es un parámetro de resistencia al corte que representa la capacidad del suelo para mantenerse unido debido a fuerzas internas, cementación, compactación o interacción entre partículas finas. En el análisis de estabilidad, una mayor cohesión incrementa la resistencia disponible frente al deslizamiento; mientras que una reducción de este parámetro puede disminuir el factor de seguridad (Budhu, 2011; Das & Sobhan, 2018).

2.5.5. Ángulo de fricción interna

Caracteriza la contribución del rozamiento y del engranamiento entre partículas a la resistencia al corte del suelo. Su influencia es especialmente relevante en materiales granulares. En la presente investigación, se incorporó como uno de los principales parámetros geotécnicos de entrada en el modelamiento de estabilidad desarrollado en Slide V6.004.

2.5.6. Peso unitario

Representado como γ, expresa el peso del material por unidad de volumen. Este parámetro influye en las fuerzas actuantes del talud, debido a que un mayor peso unitario incrementa el peso de la masa potencialmente deslizante. En esta investigación, el peso unitario se considera dentro del análisis estático, pseudoestático, de sensibilidad y Monte Carlo complementario.

2.5.7. Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) expresa la relación entre la resistencia disponible y la demanda movilizada en una masa potencialmente inestable. En un análisis por equilibrio límite, FS = 1.00 representa la condición de equilibrio límite; FS < 1.00 indica que la resistencia disponible resulta insuficiente dentro del modelo; y FS > 1.00 indica que la resistencia supera a la requerida para alcanzar dicho equilibrio. Sin embargo, un valor superior a la unidad no implica por sí solo el cumplimiento de un criterio aceptable de estabilidad, ya que debe contrastarse con el factor mínimo establecido por la normativa o criterio técnico aplicable (Duncan et al., 2014; Abramson et al., 2002).

2.5.8. Margen de seguridad

Se expresa como:

$$MS = FS - 1.00$$

Este indicador expresa la diferencia del factor de seguridad respecto de la condición de equilibrio límite. Un valor positivo corresponde a FS > 1.00; un valor nulo, a FS = 1.00; y un valor negativo, a FS < 1.00. El margen de seguridad permite comparar la cercanía relativa de los resultados respecto al equilibrio límite, pero no sustituye el criterio de aceptación definido por el factor de seguridad mínimo aplicable.

2.5.9. Análisis estático

Evalúa la estabilidad del talud considerando su geometría, el peso propio del terreno y los parámetros de resistencia del suelo, sin incorporar solicitaciones sísmicas. Se utilizó como condición de referencia para analizar la estabilidad de las secciones referentes a la cresta, la zona media y el pie del talud.

2.5.10. Análisis pseudoestático

El análisis pseudoestático evalúa la estabilidad del talud bajo una acción sísmica simplificada, representada mediante fuerzas inerciales equivalentes. Estas fuerzas se incorporan mediante el coeficiente sísmico horizontal kh y, en algunos casos, el coeficiente vertical kv. En esta investigación se adopta kh = 0.175 y kv = 0.00 para el escenario pseudoestático base (Kramer, 1996; Bray & Travasarou, 2011).

2.5.11. Coeficiente sísmico horizontal kh

El coeficiente sísmico horizontal kh representa de manera simplificada la acción sísmica horizontal aplicada sobre la masa susceptible de deslizamiento. En la presente

investigación se adoptó como valor base referencial kh = 0.175, obtenido mediante el criterio simplificado kh = 0.50 × Z, considerando Z = 0.35 como factor de zona de referencia según la Norma Técnica E.030.

2.5.12. Método de Spencer

Es un método de equilibrio límite que satisface simultáneamente el equilibrio de fuerzas y momentos. Debido a esta condición, se considera un método riguroso para el análisis de estabilidad de taludes. En esta investigación, el método de Spencer se utilizó para calcular los FS reportados mediante Slide V6.004.

2.5.13. Superficie de falla

Define la trayectoria potencial de deslizamiento de una masa de suelo cuando las solicitaciones desestabilizadoras exceden la resistencia al corte disponible. En el modelamiento realizado, se identificó como superficie crítica aquella que presentó el menor factor de seguridad entre las superficies evaluadas.

2.5.14. Análisis de sensibilidad

Permite evaluar cómo cambia el factor de seguridad cuando se modifican individualmente los parámetros de entrada. En esta investigación, se varían la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en condición pseudoestática, el coeficiente sísmico horizontal kh.

2.5.15. Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es un procedimiento probabilístico que permite generar múltiples escenarios mediante la variación aleatoria de los parámetros de entrada dentro de rangos definidos. En esta investigación, se utiliza como análisis complementario y exploratorio para evaluar la distribución del factor de seguridad, la proporción de realizaciones con FS < 1.00 y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional, dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.

2.5.16. Slide V6.004

El software constituye la herramienta de modelamiento bidimensional para analizar la estabilidad de taludes mediante métodos de equilibrio límite. En esta investigación se empleó para determinar los factores de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas aplicando el método de equilibrio límite de Spencer

(Rocscience Inc., s. f.).

2.5.17. ModelRisk

ModelRisk es la herramienta empleada para desarrollar la simulación Monte Carlo complementaria. En esta investigación permite evaluar la distribución simulada del factor de seguridad y la sensibilidad estadística de la respuesta a partir de la variación simultánea de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario y, en los escenarios pseudoestáticos, del coeficiente sísmico horizontal kh, dentro de los rangos y distribuciones VosePERT de escenario adoptados (Vose Software, s. f.).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Enfoque, tipo y nivel de investigación

La investigación empleó un enfoque cuantitativo, debido a que utilizó datos numéricos provenientes de la caracterización geotécnica, los ensayos de laboratorio y el modelamiento computacional para analizar la estabilidad bidimensional de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa. Se evaluaron los parámetros geotécnicos y los factores de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Asimismo, se emplearon procedimientos de estadística descriptiva y análisis de sensibilidad como apoyo para la contrastación técnica de las hipótesis. Este enfoque es congruente con lo señalado por Arias Gonzáles y Covinos Gallardo (2021), quienes lo relacionan con el estudio de variables observables y cuantificables mediante procedimientos numéricos.

Según su finalidad, la investigación es de tipo básica, debido a que busca ampliar el conocimiento sobre la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional de las secciones evaluadas, sin ejecutar directamente una intervención, obra de estabilización o solución constructiva sobre el talud. Los resultados obtenidos proporcionan conocimiento técnico que puede servir como fundamento para investigaciones posteriores y para futuras evaluaciones geotécnicas del sector. Arias Gonzáles y Covinos Gallardo (2021) señalan que la investigación básica se orienta a generar conocimiento y servir de base teórica para estudios posteriores, sin que su finalidad inmediata sea la ejecución de una solución práctica.

Respecto al nivel de investigación, el estudio corresponde al nivel explicativo, debido a que busca determinar la influencia de la variable independiente, variabilidad geotécnica, sobre la variable dependiente, estabilidad bidimensional del talud. Esta influencia se evalúa a partir de los cambios producidos en el factor de seguridad frente a variaciones controladas de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en condición pseudoestática, el coeficiente sísmico horizontal \(k_h\). El análisis se complementa mediante procedimientos estadísticos descriptivos y de sensibilidad de la respuesta simulada, utilizados como apoyo a la contrastación técnica de las hipótesis específicas relacionadas con dicha influencia. Según Arias Gonzáles y Covinos Gallardo (2021), el alcance explicativo busca establecer relaciones entre variables independientes y dependientes y analizar los efectos producidos sobre la variable de respuesta.

En relación con el diseño metodológico, la investigación corresponde a un diseño

no experimental y de corte transversal, debido a que las condiciones geotécnicas del terreno y los resultados de laboratorio fueron obtenidas sin manipular deliberadamente las condiciones naturales del área de estudio y durante una única campaña de investigación. Posteriormente, los parámetros obtenidos fueron utilizados en modelos computacionales para desarrollar el análisis estático, pseudoestático y de sensibilidad. La variación de parámetros realizada durante el análisis de sensibilidad corresponde a un procedimiento de modelamiento numérico y no constituye una intervención experimental sobre las condiciones reales del terreno. Arias Gonzáles y Covinos Gallardo (2021) señalan que en los diseños no experimentales las variables son observadas en su contexto sin modificar deliberadamente las condiciones en las que se presentan.

Finalmente, la investigación emplea el método hipotético-deductivo, debido a que parte de hipótesis formuladas sobre la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad del talud y las contrasta mediante resultados obtenidos de la caracterización geotécnica, el modelamiento de equilibrio límite, el análisis de sensibilidad y los procedimientos estadísticos correspondientes. Este método permite partir de planteamientos teóricos e hipótesis para derivar consecuencias susceptibles de contrastación mediante evidencia empírica y analítica (Figueroa-Rodríguez & Sangerman-Jarquín, 2022).

3.2. Diseño de la investigación

Adoptó un diseño no experimental, puesto que las condiciones geotécnicas del terreno se caracterizaron sin modificar deliberadamente las variables durante la exploración de campo. El estudio fue de corte transversal, dado que los datos procedieron de una campaña geotécnica realizada en un periodo definido. Esta clasificación se sustentó en lo señalado por Arias Gonzáles y Covinos Gallardo (2021), quienes describen los diseños no experimentales como aquellos que analizan las variables sin intervención experimental, y los transversales como estudios que recopilan información en un momento o periodo determinado.

A partir de la información recopilada, se desarrolló el modelamiento geotécnico en Slide V6.004 para evaluar la influencia de la variabilidad geotécnica sobre el factor de seguridad. Se modelaron tres secciones representativas correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud, empleando una geometría bidimensional común de referencia y parámetros geotécnicos diferenciados para cada sección

La variabilidad geotécnica constituyó la variable independiente del análisis, representada mediante las diferencias y variaciones de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario del suelo. La estabilidad bidimensional del talud constituyó la variable dependiente, evaluada mediante el factor de seguridad estático, el factor de seguridad pseudoestático, el margen de seguridad, la variación del factor de seguridad y el análisis de sensibilidad. De manera complementaria, se empleó la simulación Monte Carlo para evaluar la distribución del FS, la proporción de realizaciones con FS < 1.00 y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional, dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.

La Figura 8 presenta el flujo metodológico que fue construido desde el acotamiento del área de estudio hasta el análisis e interpretación de los resultados.

Figura 8

Diagrama de flujo metodológico del desarrollo de la investigación



Nota. El diagrama sintetiza la secuencia metodológica seguida en la investigación, desde la delimitación del área de estudio y la caracterización geotécnica hasta el modelamiento, la contrastación técnica de la hipótesis, los análisis complementarios y la formulación de conclusiones y recomendaciones.

3.2.1. Matriz de operacionalización de variables

Tabla 2

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición operacional	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Escala
Variable independiente: Variabilidad geotécnica	Se operacionaliza mediante las diferencias observadas entre los valores representativos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario determinados para las secciones de cresta, zona media y pie del talud a partir de la caracterización geotécnica y los ensayos realizados. La variación controlada de estos parámetros empleada posteriormente en el análisis de sensibilidad constituye un procedimiento paramétrico de modelamiento y no se interpreta como medición de la variabilidad espacial real del terreno.	Cohesión	Cohesión efectiva, c′	kPa	Razón
		Ángulo de fricción interna	Ángulo de fricción interna efectiva, φ′	grados (°)	Razón
		Peso unitario	Peso unitario, γ	kN/m³	Razón
Variable dependiente: Estabilidad bidimensional del talud	Se operacionaliza mediante el factor de seguridad calculado con Slide V6.004 empleando el método de Spencer, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, así como mediante su variación, margen de seguridad y respuesta frente a cambios paramétricos.	Estabilidad estática	Factor de seguridad estático	Adimensional	Razón
		Estabilidad pseudoestática	Factor de seguridad pseudoestático	Adimensional	Razón
		Evaluación comparativa	Variación absoluta del FS, ΔFS	Adimensional	Razón
		Evaluación comparativa	Reducción porcentual del FS	%	Razón
		Margen de seguridad	MS = FS − 1	Adimensional	Intervalo
		Sensibilidad del factor de seguridad	Variación del FS frente a cambios de c′, φ′, γ y kh	Adimensional	Intervalo

Nota. La variable independiente, variabilidad geotécnica, se operacionaliza a través de los parámetros de cohesión efectiva, ángulo de fricción interna efectiva y peso unitario empleados en el modelamiento. La variable dependiente, estabilidad bidimensional del talud, es evaluada a través del FS estático y pseudoestático y sus indicadores derivados. El coeficiente sísmico horizontal kh se utiliza como parámetro modelado en la condición pseudoestática y análisis de sensibilidad, y no como dimensión de la variabilidad geotécnica. La simulación Monte Carlo se utiliza para evaluar la distribución del FS, y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional dentro de los rangos y distribuciones de escenario establecidos.

En la presente investigación no se realizó medición directa de presión de poros mediante piezómetros ni monitoreo del nivel freático. Por ello, la presión de poros se considera dentro del marco teórico, pero no se incorpora como variable activa en el modelamiento de estabilidad. El análisis se centra en los parámetros geotécnicos obtenidos en laboratorio y en su influencia sobre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos.

3.2.2. Análisis de variables

El análisis de variables se desarrolló a partir de la relación técnica entre las diferencias geotécnicas observadas en las secciones representativas y la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática del talud. La variable independiente correspondió a la variabilidad geotécnica observada, representada por las diferencias entre los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario determinados para la cresta, zona media y pie del talud. Estos parámetros fueron obtenidos a partir de la caracterización geotécnica y los ensayos realizados y posteriormente utilizados como datos de entrada en los modelos bidimensionales de estabilidad.

La variable dependiente correspondió a la estabilidad bidimensional del talud, evaluada mediante el factor de seguridad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para ello, se emplearon modelos desarrollados en el software Slide V6.004, utilizando el método de equilibrio límite de Spencer para calcular los factores de seguridad reportados.

El análisis de la variable independiente se realizó mediante la caracterización de los parámetros geotécnicos obtenidos en las calicatas ejecutadas en el área de estudio. Estos resultados permitieron identificar la variación de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario entre las zonas evaluadas, estableciendo las diferencias geotécnicas existentes entre la cresta, zona media y pie del talud.

El análisis de la variable dependiente se efectuó a partir de los factores de seguridad calculados para cada sección representativa bajo dos escenarios: condición estática y condición pseudoestática. En la condición pseudoestática se incorporó el coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y el coeficiente vertical kv = 0.00, con la finalidad de representar una acción sísmica simplificada en el modelo.

Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos entre ambas condiciones, determinando la variación del factor de seguridad, la reducción porcentual y el margen de seguridad MS = FS - 1.00. Asimismo, se desarrolló el análisis de sensibilidad y la

simulación Monte Carlo complementaria, interpretando sus resultados dentro de los rangos y supuestos adoptados, sin atribuirles un alcance probabilístico absoluto para el talud.

Para precisar el alcance metodológico, se distinguieron tres conceptos. La variabilidad geotécnica observada comprendió las diferencias entre los parámetros representativos de las secciones evaluadas, determinados a partir de los trabajos de campo y los ensayos de laboratorio. La sensibilidad paramétrica consistió en modificar de forma controlada los parámetros de entrada en escenarios definidos para examinar su incidencia en el factor de seguridad. Estas modificaciones correspondieron a condiciones de modelamiento y no a nuevas mediciones de la variabilidad espacial del terreno. Finalmente, la incertidumbre probabilística exploratoria se evaluó mediante la variación simultánea de los parámetros en la simulación Monte Carlo, utilizando distribuciones de escenario. Debido al número limitado de determinaciones mecánicas independientes, estas distribuciones no se interpretaron como representaciones estadísticamente calibradas de la población del área de estudio.

La investigación se desarrolló mediante cinco fases secuenciales de trabajo, complementadas con el procedimiento estadístico de contrastación establecido en el apartado 3.2.3.

Fase 1. Caracterización de la variabilidad geotécnica del suelo

Durante el reconocimiento del área se identificaron tres zonas representativas del talud: cresta, zona media y pie. Los resultados de laboratorio fueron analizados con el objeto de caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, determinar los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario que fueron incorporados al modelamiento de estabilidad.

Fase 2. Análisis bidimensional de estabilidad bajo condiciones estáticas

Se elaboraron modelos bidimensionales en Slide V6.004 a partir de los parámetros geotécnicos obtenidos experimentalmente. Mediante el análisis de equilibrio límite se calcularon los factores de seguridad en condición estática y se estableció la estabilidad de referencia para la cresta, zona media y pie del talud.

Fase 3. Análisis bidimensional de estabilidad bajo condición pseudoestática

La acción sísmica se incorporó a los modelos mediante un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00. Con esta representación

pseudoestática se calcularon los factores de seguridad de cada sección y se compararon con los resultados estáticos para evaluar la variación de la estabilidad ante la solicitación sísmica adoptada.

Fase 4. Análisis de sensibilidad

Se desarrolló el análisis de sensibilidad mediante la variación individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario. En los escenarios pseudoestáticos también se evaluó la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, considerando valores asociados al factor de zona sísmica Z = 0.35. Esta fase permitió identificar qué parámetros generan mayores cambios en el factor de seguridad.

Fase 5. Simulación Monte Carlo complementaria e interpretación comparativa

Finalmente, se desarrolló la simulación Monte Carlo complementaria mediante ModelRisk con 10 000 realizaciones por escenario, utilizando distribuciones VosePERT de escenario para la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en condición pseudoestática, el coeficiente sísmico horizontal kh. Los resultados se interpretaron mediante la media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación, percentiles P5 y P95 y proporción de realizaciones con FS < 1.00. Asimismo, se evaluó la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Esta fase permitió complementar la interpretación determinística de Slide V6.004, caracterizar la distribución simulada del FS e identificar la sensibilidad relativa de las variables de entrada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados, sin atribuir a las realizaciones carácter de observaciones geotécnicas independientes ni inferencia estadística poblacional.

En conjunto, el diseño metodológico permitió identificar la variabilidad geotécnica del suelo, analizar la estabilidad bidimensional del talud bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas, contrastar la respuesta de las distintas secciones representativas y determinar la incidencia de los parámetros geotécnicos sobre los factores de seguridad correspondientes al talud del barrio La Recoleta.

3.2.3. Análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta paramétrica y criterios de contrastación de las hipótesis

Para la contrastación de las hipótesis específicas 4 y 5 se desarrolló un análisis

estadístico descriptivo de la respuesta del FS a partir de los escenarios del análisis de sensibilidad. Los datos empleados corresponden a resultados determinísticos generados mediante Slide V6.004 al modificar de manera controlada un parámetro de entrada y mantener constantes la geometría y los demás parámetros del modelo. Por tanto, estos escenarios no constituyen observaciones geotécnicas independientes ni una muestra probabilística de la población de taludes.

La magnitud de la respuesta del factor de seguridad se cuantificó mediante el factor de seguridad mínimo (FSmín), el factor de seguridad máximo (FSmáx), la amplitud absoluta de variación del factor de seguridad (ΔFS) y la amplitud relativa de respuesta respecto al factor de seguridad del escenario base (ARFS). Estos indicadores permiten comparar cuánto cambia el factor de seguridad dentro del rango paramétrico evaluado.

$$\Delta FS = FS_{máx} - FS_{mín}$$

$$ARFS = \frac{FS_{máx} - FS_{mín}}{FS_{base}} x100$$

donde:

ΔFS = amplitud absoluta de variación del FS;

ARFS = amplitud relativa de respuesta del FS (%)

FSmáx = máximo factor de seguridad registrado en los escenarios evaluados

FSmín = mínimo factor de seguridad registrado en los escenarios evaluados

FSbase = factor de seguridad calculado con el valor base del parámetro analizado.

Como análisis complementario, se efectuó un ajuste lineal descriptivo entre los valores del parámetro modificado y los factores de seguridad obtenidos. La pendiente β1 permitió reconocer si la respuesta aumentó o disminuyó, mientras que el coeficiente de determinación R^2 indicó el grado de ajuste de los resultados a una tendencia lineal dentro del intervalo evaluado. Ambos indicadores se utilizaron únicamente para caracterizar la respuesta del modelo, sin atribuirles alcance causal ni emplearlos para realizar inferencias estadísticas sobre la población de taludes.

El coeficiente de correlación por rangos de Spearman (ρs) fue empleado como indicador complementario del orden de respuesta, utilizándose de forma exclusiva para describir la dirección y la regularidad monotónica del factor de seguridad generado en los cinco escenarios paramétricos obtenidos mediante análisis determinístico. Un valor positivo del ρs indica que el factor de seguridad se incrementa conforme aumenta el

parámetro analizado; un valor negativo refleja una disminución ordenada del factor de seguridad a medida que el parámetro se incrementa. Debido a que los cinco pares de datos analizados no corresponden a observaciones independientes obtenidas mediante un muestreo probabilístico, el coeficiente de Spearman fue empleado con fines descriptivos y no como una prueba inferencial ni como evidencia de una asociación representativa de una población.

Aunque matemáticamente puede obtenerse un valor p exacto asociado al ordenamiento de los cinco escenarios, dicho valor no se emplea como criterio de significancia inferencial ni como criterio de aceptación o rechazo de las hipótesis de investigación, debido al origen determinístico y no independiente de los escenarios analizados. En consecuencia, la contrastación de las hipótesis específicas 4 y 5 se fundamenta en la respuesta técnica del modelo y no en una prueba de significancia poblacional.

De manera complementaria al análisis determinístico de sensibilidad, se desarrolló un análisis estadístico de sensibilidad sobre las simulaciones Monte Carlo ejecutadas en ModelRisk. Para ello, la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (φ) y el peso unitario (γ) fueron considerados como variables de entrada del modelo; en la condición pseudoestática se incorporó además el coeficiente sísmico horizontal (kh). El factor de seguridad (FS) se mantuvo como variable de salida. Para cada sección y condición de análisis se ejecutaron 10 000 realizaciones numéricas, conservando las distribuciones VosePERT y los rangos de escenario definidos para la simulación Monte Carlo.

La sensibilidad estadística de la respuesta se evaluó mediante tres indicadores complementarios: la correlación de rango, empleada para describir la dirección y magnitud de la asociación monotónica entre cada variable de entrada y el factor de seguridad; los coeficientes beta estandarizados obtenidos mediante regresión, utilizados para comparar la sensibilidad relativa de las variables de entrada sobre el FS dentro del modelo lineal aproximado; y la contribución proporcional, utilizada para cuantificar la participación relativa de cada variable en la dispersión de la respuesta simulada. La interpretación conjunta de estos indicadores permitió establecer la sensibilidad relativa de los parámetros dentro de cada sección y condición modelada.

Las 10 000 realizaciones corresponden a simulaciones numéricas del modelo y no a observaciones geotécnicas independientes obtenidas mediante muestreo probabilístico.

Por tanto, la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional se interpretan como medidas de sensibilidad estadística de la respuesta simulada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Estos indicadores no constituyen pruebas de significancia poblacional, no caracterizan probabilísticamente la variabilidad espacial del terreno y sus resultados no son generalizables a la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

Para la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario se evaluaron cinco niveles de sensibilidad correspondientes a −20 %, −10 %, valor base, +10 % y +20 %. Estos porcentajes representan perturbaciones paramétricas controladas empleadas para explorar la sensibilidad del factor de seguridad y no se consideran mediciones de variabilidad espacial real del terreno. En el caso del coeficiente sísmico horizontal kh se utilizaron los valores 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500.

Para la hipótesis específica 4 se analizaron las relaciones cohesión–FS, ángulo de fricción interna–FS y peso unitario–FS en las secciones de cresta, zona media y pie del talud. Para la hipótesis específica 5 se analizaron las mismas relaciones bajo condición pseudoestática y, adicionalmente, la relación entre el coeficiente sísmico horizontal kh y el FS.

El criterio de contrastación de las hipótesis específicas 4 y 5 se estableció mediante la integración de dos niveles de análisis. El primero correspondió al análisis determinístico de sensibilidad, en el cual se evaluó: (a) la magnitud del cambio del factor de seguridad mediante ΔFS y ARFS; (b) la dirección de la respuesta mediante la pendiente y el signo del coeficiente descriptivo de Spearman (ρs); y (c) la consistencia de la tendencia dentro del rango modelado mediante R^2 y el ordenamiento monotónico de los resultados. El segundo correspondió al análisis estadístico de sensibilidad de las simulaciones Monte Carlo, mediante el cual se evaluó la dirección y magnitud de la asociación entrada–salida a través de la correlación de rango, la sensibilidad relativa mediante los coeficientes beta estandarizados y la participación relativa de cada variable mediante la contribución proporcional a la propagación de la respuesta.

La hipótesis correspondiente se consideró respaldada cuando el análisis determinístico evidenció cambios sistemáticos del factor de seguridad frente a la modificación controlada de los parámetros y el análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo mostró una dirección de respuesta coherente y permitió cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de las variables de entrada sobre el FS dentro de los rangos y

distribuciones de escenario adoptados. Esta contrastación se limita a la respuesta de los modelos evaluados y no constituye una prueba de significancia poblacional ni permite generalizar estadísticamente los resultados a la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

El desarrollo detallado de los indicadores de amplitud, ajuste lineal y correlación por rangos de Spearman para las hipótesis específicas 4 y 5 se presenta en el Anexo 14.

Las salidas generadas mediante ModelRisk que sustentaron el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada, correspondientes a la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional para las condiciones estática y pseudoestática, se presentan en el Anexo 17.

3.3. Método de investigación

La investigación empleó el método hipotético-deductivo, al partir de hipótesis sobre la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional del talud. Sus implicaciones se evaluaron mediante la caracterización del terreno, el modelamiento por equilibrio límite, el análisis de sensibilidad y los procedimientos estadísticos complementarios. Se examinó cómo las variaciones de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario modificaron el factor de seguridad de las tres secciones representativas. En condición pseudoestática, también se evaluó la incidencia del coeficiente sísmico horizontal. La información de campo, los ensayos de laboratorio y los resultados del modelamiento proporcionaron la evidencia para contrastar técnicamente las hipótesis, con un alcance limitado a las secciones, condiciones y escenarios analizados (Figueroa-Rodríguez & Sangerman-Jarquín, 2022).

El procedimiento metodológico se organizó en etapas sucesivas. En primer lugar, se identificó el área de estudio correspondiente al barrio La Recoleta, ubicado en la margen del río Chili, Arequipa. Posteriormente, se recopilaron los datos geotécnicos mediante actividades de campo y ensayos de laboratorio, con la finalidad de obtener los parámetros físicos y resistentes del suelo. Estos parámetros fueron empleados como datos de entrada para el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

Durante la etapa de modelamiento se determinaron los FS correspondientes a las condiciones estáticas y pseudoestáticas mediante Slide V6.004. Con la finalidad de mantener un mismo criterio de cálculo y facilitar la comparación de los resultados, se empleó el método de equilibrio límite de Spencer, debido a que satisface simultáneamente

las condiciones de equilibrio de fuerzas y momentos.

En consecuencia, los factores de seguridad finales reportados en la investigación y los escenarios desarrollados en el análisis de sensibilidad corresponden al método de Spencer. Asimismo, los coeficientes empleados en el modelo de respuesta de la simulación Monte Carlo complementaria fueron obtenidos a partir de los resultados del análisis de sensibilidad calculados mediante este mismo método. Para el análisis pseudoestático determinístico se empleó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00, con la finalidad de representar de manera simplificada la acción sísmica. Los demás métodos de equilibrio límite descritos en el fundamento teórico no fueron utilizados para reportar los factores de seguridad finales de la investigación.

En relación con la condición hidráulica, durante la investigación no se instalaron piezómetros, no se efectuó una medición directa del nivel freático y no se determinó la presión de poros real del terreno. Por esta razón, en los modelos desarrollados en Slide V6.004 no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros. En consecuencia, los factores de seguridad obtenidos corresponden al escenario de modelamiento adoptado sin presión de poros y no representan una condición hidrogeológica comprobada en campo. La posible influencia de la saturación, la infiltración o las variaciones estacionales del río Chili deberá evaluarse posteriormente mediante instrumentación y monitoreo hidrogeológico.

El análisis de sensibilidad exploró el comportamiento del factor de seguridad y las variaciones de este frente a cambios controlados en algunos parámetros de entrada. La simulación Monte Carlo complementaria en ModelRisk, por su parte, caracterizó la distribución del FS y evaluó la sensibilidad estadística de la respuesta en su interior en función de los rangos y distribuciones establecidos para cada escenario.

3.3.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al tramo del río Chili ubicado en el barrio La Recoleta, distrito, provincia y departamento de Arequipa. Este sector comprende una extensión aproximada de 0.52 km y presenta taludes ribereños con condiciones geomorfológicas y geotécnicas que justifican su evaluación bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

El sector fue seleccionado debido a la presencia de superficies inclinadas, variaciones topográficas, diferencias en las condiciones del suelo y cercanía a zonas

urbanas e infraestructura existente. Estas características permiten analizar la variabilidad geotécnica del terreno y su influencia en la estabilidad bidimensional del talud.

Para el desarrollo de la investigación se consideraron tres zonas o posiciones geomorfológicas del talud: cresta, zona media y pie. Asimismo, las calicatas se organizaron en tres sectores de exploración distribuidos a lo largo del área de estudio. A partir de la información obtenida se definieron las secciones representativas utilizadas posteriormente en el modelamiento bidimensional.

Figura 9

Mapa satelital de extensión del área de estudio



Nota. Tomado de Google Earth, 2026.

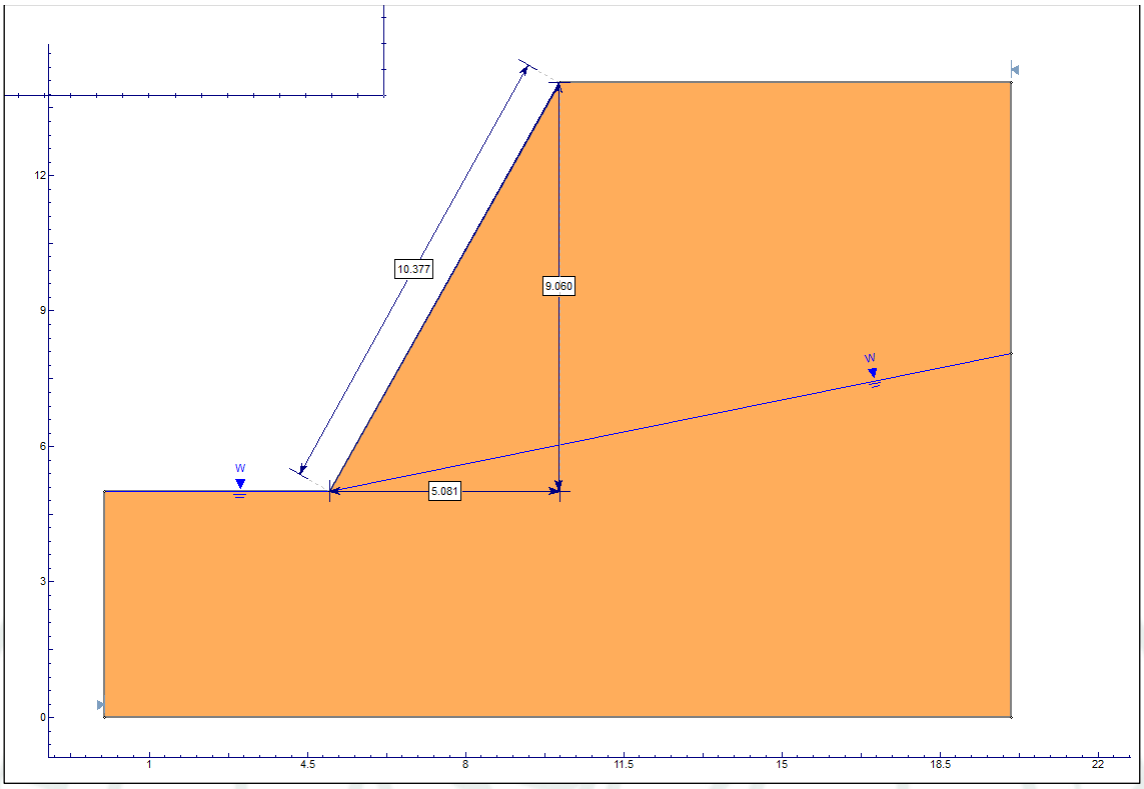
3.3.1.1. Geometría y dimensiones referenciales del talud

Como parte del reconocimiento del área de estudio, se identificaron las dimensiones referenciales del talud dentro del tramo estudiado. A partir de estas dimensiones se estableció una geometría bidimensional común de referencia, empleada en el modelamiento mediante Slide V6.004.

La representación geométrica consideró las condiciones observadas en campo y permitió diferenciar posiciones representativas del talud, tales como la cresta, zona media y pie. Esta información fue utilizada como referencia para la construcción de los modelos estáticos y pseudoestáticos desarrollados en la investigación.

Figura 10

Dimensiones referenciales del talud evaluado



Nota. La figura muestra las dimensiones referenciales consideradas para la representación geométrica del talud evaluado. Elaboración propia.

3.3.1.2. Población

Estuvo conformada por los taludes ribereños localizados en el tramo del río Chili correspondiente al barrio La Recoleta, Arequipa. Estos taludes presentan condiciones geométricas, estratigráficas y geotécnicas variables, por lo que constituyen el conjunto de unidades susceptibles de evaluación dentro del área de estudio.

3.3.1.3. Muestra

La muestra estuvo constituida por tres secciones representativas correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud dentro del tramo estudiado. Estas secciones representan posiciones diferenciadas de un mismo talud y no constituyen tres taludes independientes. Su selección permitió evaluar las diferencias geotécnicas y comparar la estabilidad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En las tres zonas se ejecutaron exploraciones mediante calicatas, obteniéndose la información necesaria para la caracterización geotécnica y el desarrollo de los modelos bidimensionales de estabilidad en Slide V6.004.

3.3.1.4. Muestreo

Fue no probabilístico de tipo intencional, debido a que las secciones

representativas fueron seleccionadas considerando criterios técnicos relacionados con la representatividad geomorfológica del talud, la accesibilidad para la ejecución de exploraciones geotécnicas, la variabilidad estratigráfica observada y la proximidad a infraestructura ubicada en el área de influencia.

El procedimiento posibilitó la obtención de información representativa para la elaboración del presente análisis de estabilidad sin que el propósito consistiese en realizar inferencias estadísticas sobre todos los taludes del sector.

3.3.1.5. Unidad de análisis

La unidad de análisis estuvo constituida por las tres secciones representativas del talud: cresta, zona media y pie. Cada sección fue evaluada mediante un análisis bidimensional de estabilidad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas utilizando modelos desarrollados en Slide V6.004.

3.3.1.6. Unidad de observación

La muestra estuvo compuesta por las nueve calicatas ejecutadas, distribuidas a razón de tres en cada zona de estudio, así como por las muestras de suelo que se obtuvieron de las exploraciones geotécnicas. A partir de la observación de las mismas y de las muestras se establecieron las propiedades físicas y mecánicas que se emplearon en la caracterización del terreno y el posterior análisis de estabilidad.

3.3.1.7. Representatividad de la muestra

La selección intencional de las tres secciones permitió comparar las condiciones geotécnicas observadas en la cresta, zona media y pie del talud y analizar el comportamiento de sus factores de seguridad en condición estática y pseudoestática. Los resultados se encuentran circunscritos a las secciones estudiadas y no constituyen una representación estadística de la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

3.3.2. Recolección de datos

Las actividades incluyeron trabajos de campo, ensayos de laboratorio y actividades de gabinete. La información obtenida fue utilizada para determinar los parámetros requeridos para el modelado bidimensional de la estabilidad de los taludes del barrio La Recoleta en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En los trabajos de campo se reconoció la zona de estudio y se identificaron tres zonas representativas (cresta, zona media y pie del talud). En estas zonas se realizaron

calicatas para caracterizar las condiciones del terreno, describir los materiales presentes y tomar muestras que serían sometidas a ensayos de laboratorio.

Las muestras fueron identificadas y transportadas al laboratorio para realizar ensayos que determinaran la humedad, los límites de Atterberg, el peso unitario, la cohesión, el ángulo de fricción interna y la clasificación del suelo. La caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de cada zona representativa permitió identificar los parámetros necesarios para el análisis de estabilidad. El reconocimiento de campo, la ejecución de calicatas y la toma de muestras se realizaron entre el 18 y el 20 de noviembre de 2025. Posteriormente, los ensayos de laboratorio se desarrollaron entre el 17 de noviembre y el 12 de diciembre de 2025, conforme a la constancia emitida por el Laboratorio de Ensayo de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María. Finalmente, la información obtenida fue procesada en gabinete para el modelamiento, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria.

Con los resultados de laboratorio se definieron los parámetros de entrada para el software Slide V6.004, considerando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para cada zona del talud se incorporaron valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario. Asimismo, en el análisis pseudoestático se consideró el coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y el coeficiente vertical kv = 0.00.

Con la información obtenida se elaboraron los modelos bidimensionales y se calcularon los FS en condiciones estáticas y pseudoestáticas. Estos datos también sustentaron el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria ejecutada en ModelRisk. Así, los resultados de campo y laboratorio proporcionaron la base técnica para examinar la incidencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad del talud.

3.3.2.1. Fundamentación del número de ensayos realizados

La cantidad y distribución de los ensayos de laboratorio se definieron considerando la finalidad específica de cada prueba, la distribución de las nueve calicatas ejecutadas en tres sectores de exploración, considerando en cada sector las posiciones de cresta, zona media y pie del talud, la disponibilidad y condición del material recuperado y el criterio de representatividad requerido para la caracterización geotécnica. En total, se ejecutaron nueve calicatas distribuidas en tres sectores de exploración; considerando el conjunto de los sectores, se contó con tres calicatas en la cresta, tres en la zona media y

tres en el pie del talud.

Los ensayos de caracterización física se distribuyeron de acuerdo con la cantidad de material disponible y con la información requerida para cada muestra. El contenido de humedad (24 muestras) y el análisis granulométrico (24 muestras) se realizaron sobre la totalidad de las muestras disponibles; los ensayos de densidad máxima y mínima (9 muestras), límites de Atterberg (9 muestras), clasificación SUCS (9 muestras) y gravedad específica (9 muestras) se desarrollaron sobre una muestra representativa por cada calicata; mientras que para el ensayo de permeabilidad se seleccionaron tres muestras, una representativa por cada zona del talud: cresta, zona media y pie. Esta distribución permitió caracterizar las propiedades físicas y de clasificación necesarias para diferenciar las condiciones geotécnicas de las tres secciones evaluadas.

La resistencia al corte se determinó en tres muestras representativas: C-01 para la cresta, C-05 para la zona media y C-08 para el pie del talud. De cada muestra se prepararon tres especímenes, que se sometieron a esfuerzos normales de aproximadamente 50.11 kPa, 99.16 kPa y 148.21 kPa. En total, se realizaron nueve ejecuciones de corte directo, con las que se obtuvieron tres puntos de resistencia por muestra. Estos puntos permitieron construir las envolventes de falla según el criterio de Mohr-Coulomb y determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción interna utilizados en el modelamiento.

La selección de una muestra para los ensayos de resistencia por cada zona respondió al diseño metodológico y a la necesidad de definir parámetros mecánicos diferenciados para las tres secciones modeladas. El muestreo fue intencional y consideró la procedencia, la profundidad de extracción, la caracterización física previa, el contenido de humedad, la granulometría y la disponibilidad de material adecuado para preparar los especímenes.

En consecuencia, el número de ensayos se estableció de acuerdo con el propósito técnico de cada determinación y con el alcance de la investigación. Las tres determinaciones de resistencia al corte no tuvieron como finalidad establecer una distribución estadística de los parámetros mecánicos para toda la extensión del barrio La Recoleta, sino obtener parámetros representativos de las tres secciones evaluadas. Por ello, la ampliación del número de determinaciones mecánicas constituye una posibilidad de mejora para investigaciones posteriores orientadas a incrementar la representatividad espacial de los parámetros resistentes.

3.3.2.2. Procedimiento y criterio de selección para el ensayo de corte directo

La determinación de los parámetros de resistencia al corte se realizó sobre las muestras C-01, C-05 y C-08, correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud, respectivamente. La selección fue de tipo intencional y se efectuó de manera progresiva durante la caracterización geotécnica, considerando los resultados de los ensayos físicos previamente realizados, la ubicación de la muestra dentro del talud, la profundidad de extracción, las características granulométricas y de clasificación, el contenido de humedad y la disponibilidad de material adecuado para la ejecución del ensayo. De esta manera, se seleccionó una muestra representativa por cada zona, priorizando, cuando correspondía, condiciones comparativamente desfavorables identificadas durante la caracterización, sin establecer la criticidad exclusivamente a partir de un único parámetro.

Los especímenes, constituidos por material secado y tamizado a través del tamiz N.º 8, fueron preparados utilizándose la fracción que pasa por el tamiz con la finalidad de controlar el tamaño máximo de las partículas y adecuarlo a las dimensiones del espécimen de ensayo. Esta preparación consideró el criterio de tamaño de partículas conforme a la norma ASTM D3080/D3080M, que establece la relación entre el tamaño máximo de partículas y las dimensiones del ejemplar. El tamiz N.º 8 se seleccionó como parte del procedimiento de preparación y no como una exigencia específica de la norma.

Posteriormente, el material seco fue acondicionado tomando como referencia la humedad basal determinada previamente conforme a la norma D2216 para cada una de las muestras elegidas; la cantidad de agua incorporada se estableció en función de la masa de suelo seco preparada y del porcentaje de humedad determinado. Los contenidos de humedad considerados como referencia fueron 15.80 % para C-01 a 0.50m, 23.50 % para C-05 a 0.50 m y 28.81 % para C-08 a 1.00 m. Luego de incorporar el agua, el material fue mezclado y mantenido brevemente en reposo para favorecer la distribución de la humedad antes de conformar el espécimen.

Las muestras empleadas en el ensayo de corte directo correspondieron a muestras alteradas, debido a que durante la excavación el material no presentó cohesión suficiente para obtener bloques que conservaran su estructura natural, por lo que fue recolectado directamente del estrato y almacenado en bolsas debidamente identificadas. Posteriormente, para la ejecución del ensayo, el material fue secado, tamizado mediante el tamiz N.° 8, acondicionado a la humedad de referencia y reconstituido en la caja de

corte mediante colocación y compactación manual por capas, efectuándose finalmente el enrasado del espécimen.

La densidad de cada espécimen se calculó a partir de su masa y volumen. Este último se obtuvo con el área de la caja de corte y la altura final del material preparado. También se determinó el peso unitario correspondiente. Se registró la densidad alcanzada en cada espécimen, sin establecer una densidad objetivo común para las tres muestras.

Los ensayos se ejecutaron conforme a ASTM D3080/D3080M, en condición consolidada drenada. Para cada muestra se realizaron tres corridas con esfuerzos normales de aproximadamente 50.11, 99.16 y 148.21 kPa. Cada corrida comprendió una etapa inicial de consolidación, seguida de la aplicación del desplazamiento de corte.

La velocidad de desplazamiento horizontal se definió a partir de la respuesta del espécimen durante la consolidación, registrada mediante el sistema de adquisición y control del equipo ELE. La curva de desplazamiento vertical y el cálculo del tiempo de consolidación permitieron establecer la velocidad de corte de cada espécimen. Según los registros originales del equipo, las velocidades de las nueve corridas oscilaron aproximadamente entre 0.417 y 0.429 mm/min. Por tanto, su selección respondió al comportamiento registrado durante la consolidación.

Los parámetros de resistencia se determinaron a partir del correspondiente esfuerzo cortante pico de cada corrida. Para cada una de las muestras los tres pares de esfuerzo normal y esfuerzo cortante máximo proporcionaron la información necesaria para construir la envolvente de Mohr-Coulomb y de esta manera poder obtener c' y φ'. En ningún caso el ensayo permitió recuperar la resistencia residual.

En total se efectuaron nueve corridas instrumentales, distribuidas en tres corridas para cada una de las muestras C-01, C-05 y C-08. Sin embargo, estas corridas corresponden metodológicamente a tres determinaciones de los parámetros c' y φ', una por cada zona analizada. En consecuencia, los resultados permiten caracterizar mecánicamente las tres secciones consideradas dentro del alcance de la investigación, pero no constituyen una caracterización estadística de la resistencia al corte de la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta. Esta condición constituye una limitación del estudio y una mayor cantidad de ensayos mecánicos por zona permitiría obtener una caracterización estadística más robusta.

3.3.2.3. Observación directa en campo

La recolección de datos se realizó mediante observación directa de campo con la finalidad de reconocer las condiciones del área de estudio, describir la geomorfología del talud y recopilar información para la caracterización geotécnica. Esta técnica fue utilizada durante el reconocimiento del tramo del río Chili que corresponde al barrio La Recoleta y la excavación de las calicatas.

Durante la observación de campo se recopiló información relacionada con la ubicación del talud, sus características topográficas, la presencia de superficies inclinadas, las condiciones de accesibilidad, la disposición de los materiales y la diferenciación de sectores de exploración. Asimismo, se identificaron tres zonas de análisis: cresta, zona media y pie del talud, las cuales fueron consideradas para la obtención de muestras y posterior modelamiento geotécnico.

También se revisó información complementaria sobre las características geográficas, geológicas y sísmicas del área de estudio. Esta revisión permitió contextualizar el comportamiento del talud dentro de su entorno natural, considerando su ubicación en la margen del río Chili, la presencia de depósitos superficiales y la exposición a condiciones sísmicas propias de la ciudad de Arequipa.

La información obtenida mediante observación directa fue complementada con los resultados de laboratorio y con el procesamiento en gabinete. A partir de ello se definieron los parámetros de entrada para el modelamiento en Slide V6.004, tales como cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario. Posteriormente, estos datos fueron utilizados para el análisis estático, pseudoestático, de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria.

3.3.2.4. Investigación de campo

Constituyó la etapa inicial para la caracterización geotécnica del área de estudio. Esta comprendió el reconocimiento del terreno, la identificación de las condiciones geomorfológicas del talud, la ejecución de calicatas a cielo abierto, la descripción estratigráfica de los perfiles y la obtención de muestras de suelo para su posterior análisis en laboratorio.

Se excavaron nueve calicatas en tres sectores de exploración. En cada sector se distribuyeron tres calicatas, ubicadas en la cresta, la zona media y el pie del talud, respectivamente.

Esta distribución permitió reconocer las condiciones geotécnicas presentes en el

barrio La Recoleta y obtener información para comparar el comportamiento del talud bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

La ubicación de las calicatas respondió a criterios técnicos de accesibilidad, representatividad geomorfológica y diferenciación de sectores dentro del talud. Durante la exploración se identificaron los estratos del suelo mediante observación directa, registro fotográfico y clasificación visual, complementándose posteriormente con los resultados de laboratorio y la clasificación conforme al SUCS.

Los trabajos de campo comprendieron la excavación de calicatas, la descripción de los perfiles estratigráficos, la extracción y el rotulado de muestras representativas, y el registro sistemático de las condiciones del terreno. La información recopilada, junto con los resultados de laboratorio, sustentó el modelamiento bidimensional en Slide V6.004, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria.

3.3.2.5. Dimensiones, profundidad y condiciones de excavación

Las calicatas fueron ejecutadas manualmente utilizando herramientas convencionales como pico, pala, barreta, badilejo y escuadra, debido a las condiciones de accesibilidad del terreno, la ubicación del área de estudio en la faja marginal del río Chili y el carácter superficial de la exploración geotécnica. Cada excavación presentó dimensiones aproximadas de 1.00 m × 1.00 m en planta, lo cual permitió mantener uniformidad en el área de exploración y facilitar la comparación entre los diferentes puntos de muestreo.

La profundidad de exploración fue definida en función del alcance metodológico aprobado en el plan de tesis y de las condiciones comunicadas ante la Autoridad Nacional del Agua – Administración Local del Agua Chili. Al tratarse de una actividad con fines de investigación, de ejecución manual y sin exceder una profundidad de 1.50 m, se presentó una comunicación formal informando la toma de muestras de suelo mediante la ejecución de nueve calicatas en el sector del barrio La Recoleta. En ese sentido, la campaña de campo se desarrolló respetando el alcance informado, la intervención manual prevista y las condiciones de seguridad propias del área de estudio.

La profundidad de 1.50 m fue adoptada como criterio de exploración superficial, considerando que el objetivo de esta etapa fue caracterizar directamente los estratos inmediatos del terreno y obtener muestras representativas para los ensayos de laboratorio, dentro del alcance establecido para la campaña de campo.

Las calicatas de la cresta y de la zona media alcanzaron una profundidad aproximada de 1.50 m. Estas excavaciones permitieron identificar los estratos superficiales y obtener muestras para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, cuyos parámetros fueron posteriormente incorporados en el modelamiento bidimensional de estabilidad.

En el pie del talud, las calicatas C-07, C-08 y C-09 alcanzaron una profundidad aproximada de 1.00 m. La presencia de cantos, bloques y otros materiales gruesos asociados a los depósitos aluviales del río Chili limitó el avance de la excavación manual. Asimismo, debido a la proximidad al cauce, se priorizó la seguridad de los trabajos y el cumplimiento de las condiciones establecidas para la intervención de campo.

La campaña correspondió a una exploración geotécnica superficial, orientada a caracterizar los estratos inmediatos del terreno dentro del alcance de la investigación. Por tanto, la caracterización de campo no reemplaza una investigación geotécnica profunda mediante perforaciones mecánicas, ensayos SPT o instrumentación piezométrica. Las profundidades alcanzadas fueron coherentes con el alcance aprobado del estudio, la comunicación realizada a la autoridad competente, el procedimiento de excavación manual y las limitaciones físicas observadas durante los trabajos de campo. En consecuencia, la interpretación de los resultados se encuentra circunscrita a la profundidad y cobertura alcanzadas durante la exploración.

En conjunto, las dimensiones y profundidades adoptadas permitieron obtener información representativa de los estratos superficiales del área de estudio, útil para la caracterización geotécnica inicial, el desarrollo de los perfiles estratigráficos y la definición de los parámetros de entrada utilizados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

3.3.2.6. Procedimiento de excavación y descripción estratigráfica

Se realizó manualmente y comprendió el reconocimiento del terreno, la apertura de calicatas, la descripción del perfil del suelo y la extracción de muestras representativas. Se emplearon herramientas convencionales, adecuando los trabajos a las condiciones de accesibilidad, seguridad y estabilidad del terreno en cada sector.

Previamente a la excavación, se identificaron los puntos de exploración correspondientes a las zonas de cresta, zona media y pie del talud, procurando que cada ubicación permitiera representar las condiciones geotécnicas del sector. Luego, se

procedió con la limpieza superficial del terreno, retirando material suelto, residuos y elementos que pudieran interferir con la observación directa del perfil.

Durante la excavación de cada calicata se registraron las características del suelo observado, tales como color, textura, humedad aparente, presencia de gravas, cantos, bloques, material fino y cambios visibles entre estratos. Esta descripción estratigráfica permitió reconocer las condiciones superficiales del terreno y diferenciar los materiales presentes en cada zona del talud.

Las calicatas ubicadas en la cresta y la zona media alcanzaron una profundidad aproximada de 1.50 m, permitiendo observar el perfil del suelo y obtener muestras para los ensayos de laboratorio. En el pie del talud, la profundidad alcanzó aproximadamente 1.00 m debido a la presencia de cantos, bloques y otros materiales gruesos asociados a los depósitos aluviales próximos al río Chili.

La descripción de los estratos se documentó mediante anotaciones y fotografías, vinculadas al código de cada calicata. Estos registros complementaron los resultados de laboratorio y sustentaron la definición de los parámetros de entrada para el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

En conjunto, el procedimiento de excavación y descripción estratigráfica permitió obtener una caracterización inicial de los estratos superficiales del talud, diferenciando las condiciones presentes en la cresta, zona media y pie. La información obtenida proporcionó una base para la definición de los parámetros empleados posteriormente en el análisis estático, pseudoestático, de sensibilidad y en la simulación Monte Carlo complementaria.

3.3.2.7. Toma de muestras y criterios de selección

Se extrajeron durante la excavación de las calicatas, tomando como referencia los perfiles estratigráficos y la representatividad de los materiales de la cresta, la zona media y el pie del talud. La extracción se efectuó manualmente, evitando incorporar material superficial, raíces, residuos u otros elementos ajenos al estrato de interés.

En cada calicata se seleccionaron muestras representativas del suelo identificado, priorizando aquellos materiales que permitieran caracterizar las propiedades físicas y mecánicas necesarias para el análisis de estabilidad. Los criterios considerados para la selección de muestras fueron la ubicación dentro del talud, el tipo de material observado, la presencia de finos, gravas, cantos, humedad aparente, cambios estratigráficos y

condiciones de accesibilidad para la extracción manual.

Las muestras se destinaron a los ensayos de contenido de humedad, límites de Atterberg, peso unitario y corte directo, así como a la clasificación del suelo. Los resultados permitieron caracterizar el material y determinar la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario utilizados en la investigación.

El muestreo se distribuyó entre las tres zonas representativas del talud. En la cresta y la zona media se extrajeron muestras hasta aproximadamente 1.50 m de profundidad, conforme al alcance aprobado y comunicado para la campaña de campo. En el pie del talud, la extracción se limitó a aproximadamente 1.00 m por la presencia de cantos, bloques y otros materiales gruesos de los depósitos aluviales próximos al río Chili.

El criterio de selección de las muestras no tuvo como finalidad representar la totalidad profunda del macizo del talud, sino caracterizar los estratos superficiales involucrados en el alcance de la presente investigación. Por ello, los resultados obtenidos fueron utilizados como base para el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria.

Finalmente, cada muestra fue codificada, rotulada y registrada según la calicata de procedencia, zona del talud y profundidad aproximada de extracción, con la finalidad de asegurar la trazabilidad de la información durante el procesamiento en laboratorio y gabinete.

3.3.2.8. Rotulado, registro y control de calidad

Cada muestra obtenida durante la campaña de campo fue almacenada en bolsas herméticas con cierre de presión, con la finalidad de conservar sus condiciones iniciales, evitar pérdidas de humedad y prevenir la contaminación con material externo durante el traslado al laboratorio. Este procedimiento permitió mantener la trazabilidad de las muestras desde su extracción hasta la ejecución de los ensayos geotécnicos.

El sistema de rotulado incluyó la identificación de la calicata, zona del talud, profundidad aproximada de extracción, fecha de muestreo y tipo de muestra. Para ello, se empleó una codificación correlativa de las calicatas, desde C-01 hasta C-09, diferenciando las zonas de cresta, zona media y pie del talud. Esta codificación permitió relacionar cada muestra con su ubicación de origen y con los resultados obtenidos posteriormente en laboratorio.

Durante la excavación de las calicatas se elaboró un registro fotográfico

sistemático que comprendió vistas generales del área, perfiles estratigráficos, fotografías con pizarra de identificación y secuencias de la extracción de muestras. Este material respaldó la descripción de campo y permitió comprobar la correspondencia entre cada muestra, su calicata de procedencia y la zona evaluada.

El control de calidad incluyó la separación de materiales de distintos estratos, el retiro del material superficial alterado antes del muestreo y la conservación de las muestras en envases adecuados. Antes del traslado, se verificó la identificación de cada bolsa. La extracción priorizó materiales representativos de los estratos superficiales, dentro de las restricciones de la excavación manual y de las condiciones del terreno próximo al río Chili.

Después de ser rotuladas y registradas, las muestras fueron transportadas al laboratorio con la finalidad de realizar ensayos físicos y mecánicos. Los resultados de estos ensayos permitieron determinar la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, utilizados posteriormente como parámetros de entrada en el modelamiento bidimensional en Slide V6.004, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria.

CALICATA C-01: Zona UTM 19K; E: 228 773.41 m; N: 8 185 784.55 m.

La excavación de la calicata C-01, ubicada en la cresta del talud, se realizó manualmente utilizando pico, pala, barreta, escuadra y badilejo.

Tabla 3

Proceso de excavación de calicatas y toma de muestras

Etapa	Actividad desarrollada	Finalidad
1	Reconocimiento del área de estudio y ubicación de los puntos de exploración	Identificar los sectores de exploración y las posiciones geomorfológicas del talud
2	Delimitación del punto de excavación	Definir el área de trabajo para cada calicata
3	Excavación manual de calicatas	Exponer el perfil superficial del suelo
4	Identificación visual del material	Reconocer cambios de textura, color y presencia de gravas o bloques
5	Toma de muestras por profundidad	Obtener material representativo para ensayos de laboratorio

6	Rotulado y almacenamiento de muestras	Evitar confusión o pérdida de identificación
7	Registro fotográfico del procedimiento	Respaldar las actividades de campo realizadas

Nota. El registro fotográfico detallado del proceso de excavación y toma de muestras se presenta en el Anexo 4.

3.3.2.9. Sustento de la profundidad de exploración y representatividad de las muestras

Se estableció el carácter superficial de la investigación geotécnica y las condiciones de intervención en el campo, de acuerdo con el contexto metodológico aprobado en el plan de tesis. Se procedió a la excavación de calicatas manuales de aproximadamente 1,00 × 1,00 m en planta, hasta una profundidad de 1,50 m como máximo. De esta forma, se logró inspeccionar directamente los estratos superficiales del talud y obtener muestras representativas para los ensayos de laboratorio.

Al ubicarse el área de estudio en la margen del río Chili, se dio comunicación formal a la Autoridad Nacional del Agua mediante la Administración Local del Agua Chili, para poder realizar la extracción de muestras de suelo en las nueve calicatas que se usarían para fines de investigación. La comunicación consideró la ejecución de una intervención manual y superficial que no excedería 1,50 m de profundidad. Se ejecutó la campaña dentro del alcance propuesto y respetando las condiciones de seguridad del terreno.

Las nueve calicatas se distribuyeron en tres sectores a lo largo del área de evaluación, una en la cresta, una en la zona media y una en el pie del talud por cada sector, para proporcionar información para inicializar la descripción de las zonas y permitir realizar la comparación en las secciones representativas en condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En la cresta y en la zona media se alcanzaron profundidades de aproximadamente 1,50 m, logrando así la identificación de los estratos superficiales considerados para la caracterización geotécnica. En el pie del talud, las calicatas C-07, C-08 y C-09, alcanzaron una profundidad de aproximadamente 1,00 m debido a la presencia de cantos, bloques y otros materiales gruesos de los depósitos aluviales que colindan con el río Chili. Esta limitación estuvo asociada a las condiciones físicas del terreno y determinó la profundidad efectiva de exploración en esta zona.

3.3.2.9.1. Correspondencia entre la profundidad explorada y las

superficies potenciales de falla

Con el fin de caracterizar las estratigrafías superficiales hasta 1,50 m de profundidad en la cresta y zona media y hasta 1,00 m de profundidad en el pie del talud se realizó una prospección mediante calicatas de las cuales se muestrearon las profundidades hasta dicha cota para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales.

Se estimó la profundidad vertical máxima de las superficies críticas de Slide V6.004 para poder contrastar la profundidad de la que se exploró la superficie con la alcanzada por las superficies potenciales de fallas del modelo, realizando el cálculo a partir de las coordenadas del contorno exterior y de los datos geométricos de cada superficie crítica circular que reportó el software: centro, radio y puntos de entrada y salida. Para cada escenario, esta profundidad se definió como la máxima distancia vertical entre el perfil del terreno y la superficie crítica de falla.

Tabla 4

Comparación entre la profundidad de exploración y la profundidad aproximada de las superficies críticas

Sección	Condición	FS	Profundidad de exploración (m)	Profundidad crítica aproximada (m)
Cresta	Estática	1.393	1.50	6.57
Cresta	Pseudoestática	1.145	1.50	5.84
Zona media	Estática	0.560	1.50	1.58
Zona media	Pseudoestática	0.423	1.50	1.58
Pie	Estática	1.129	1.00	5.54
Pie	Pseudoestática	1.000	1.00	3.72

Nota. La profundidad crítica corresponde a la máxima separación vertical aproximada entre la superficie del terreno y la superficie circular crítica obtenida mediante Slide V6.004. Los valores fueron determinados geométricamente a partir de las coordenadas y parámetros de las superficies críticas reportadas por el software y no corresponden a profundidades medidas directamente mediante exploración de campo. Los resultados de Slide empleados para esta comparación se presentan en las capturas de los seis escenarios analizados.

Las superficies críticas calculadas alcanzaron, en general, profundidades mayores

que las exploradas mediante calicatas. En la cresta, esta diferencia fue marcada: las superficies de falla llegaron aproximadamente a 6.57 m en condición estática y 5.84 m en condición pseudoestática, mientras que la exploración alcanzó 1.50 m. En el pie del talud, las profundidades calculadas fueron de 5.54 m y 3.72 m, respectivamente, frente a calicatas de aproximadamente 1.00 m.

En la zona media, la profundidad de las superficies críticas fue de aproximadamente 1.58 m en ambas condiciones, ligeramente superior a los 1.50 m explorados. La geometría de estas superficies se mantuvo prácticamente coincidente entre los dos escenarios, aunque la incorporación de la solicitación pseudoestática redujo el factor de seguridad.

En consecuencia, la exploración ejecutada permitió caracterizar directamente los estratos superficiales del terreno, pero no permitió verificar la totalidad de los materiales atravesados por las superficies potenciales de falla obtenidas mediante el modelamiento, principalmente en las secciones de cresta y pie. Para el desarrollo de los modelos bidimensionales se asumió la continuidad de las propiedades geotécnicas representativas asignadas a cada sección por debajo de la profundidad directamente explorada. Esta simplificación constituye una limitación de la investigación.

Asimismo, debido a que no se ejecutaron perforaciones mecánicas profundas, no fue posible comprobar directamente la presencia, continuidad o propiedades de posibles estratos ubicados por debajo de las profundidades alcanzadas mediante las calicatas. En consecuencia, no se descarta la existencia de variaciones estratigráficas o de propiedades geotécnicas a mayor profundidad.

Para una evaluación geotécnica de mayor detalle, se recomienda complementar la exploración superficial mediante perforaciones mecánicas y ensayos in situ, como el ensayo de penetración estándar (SPT), así como mediante métodos geofísicos tales como MASW o refracción sísmica. Estos procedimientos permitirían caracterizar los materiales a mayor profundidad y verificar la correspondencia entre la estratigrafía real y las superficies potenciales de falla obtenidas mediante el modelamiento.

Figura 11

Sector de exploración del talud dentro del área de análisis



Nota. Registro fotográfico de campo, 2025.

La Figura 11 muestra uno de los sectores de exploración del talud evaluado en el barrio La Recoleta. En la imagen se observa la configuración inclinada del terreno, la presencia de materiales superficiales expuestos y las condiciones geomorfológicas que justifican la necesidad de realizar una caracterización geotécnica y un análisis bidimensional de estabilidad. Esta evidencia fotográfica complementa la información levantada durante la etapa de campo y permite contextualizar el sector considerado para el modelamiento estático y pseudoestático.

3.3.2.10. Ensayos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio se realizaron con la finalidad de determinar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo obtenidas durante la campaña de campo. Estos ensayos permitieron caracterizar los materiales presentes en las zonas de cresta, zona media y pie del talud, así como obtener los parámetros geotécnicos necesarios para el modelamiento bidimensional de estabilidad.

Las muestras recolectadas en las nueve calicatas fueron sometidas a ensayos orientados a determinar el contenido de humedad, límites de Atterberg, clasificación SUCS, densidad máxima y mínima, peso unitario y resistencia al corte. A partir de estos procedimientos se obtuvieron los parámetros de entrada empleados en el software Slide V6.004, principalmente la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario.

Los resultados de laboratorio fueron utilizados para establecer la variabilidad geotécnica del área de estudio y diferenciar el comportamiento de los materiales presentes en cada zona evaluada. Asimismo, permitieron sustentar los valores empleados en el análisis estático, pseudoestático, de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria.

Debe precisarse que los ensayos de laboratorio se desarrollaron sobre muestras representativas de los estratos superficiales obtenidos mediante calicatas manuales. Por ello, sus resultados son coherentes con el alcance de la investigación, orientado al análisis bidimensional de estabilidad de los taludes evaluados, sin reemplazar estudios geotécnicos profundos mediante perforaciones mecánicas o ensayos in situ.

Tabla 5

NT de ensayos realizados

Ensayo	Norma ASTM
Propiedades Físicas	
Contenido de humedad	ASTM D2216
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D6913/D6913M
Densidad máxima y mínima	ASTM D4253, ASTM D4254
Límite líquido de los suelos	ASTM D4318
Límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318
Clasificación método SUCS	ASTM D2487
Gravedad específica	ASTM D854
Permeabilidad	ASTM D2434
Propiedades Mecánicas	
Ensayo de corte directo	ASTM D3080/D3080M

Nota. Las normas consignadas corresponden a ASTM International (s. f.-a, s. f.-b, s. f.-c, s. f.-d, s. f.-e, s. f.-f, s. f.-g, s. f.-h, s. f.-i).

A través de la Tabla 5 se muestran los métodos de trabajo normalizados que fueron utilizados en los ensayos de laboratorio realizados con las muestras que habían sido extraídas en campo. Este tipo de trabajo propició la determinación de las propiedades físicas y mecánicas caracterizadoras del suelo y la clasificación de éste en el marco de la caracterización geotécnica de la cresta, la zona media y el pie del talud.

En la caracterización física se determinó el contenido de humedad, se llevó a cabo el análisis granulométrico por tamizado, se calcularon las densidades máxima y mínima, se establecieron los límites de Atterberg, se determinó la gravedad específica, más el SUCS. La resistencia al corte fue determinada mediante el ensayo de corte directo, el cual sirvió para determinar la cohesión y el ángulo de fricción interna. La cohesión y el ángulo de fricción interna fueron considerados junto al peso unitario en el modelado bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

3.3.2.11. Condición hidráulica adoptada

En la presente investigación no se realizaron mediciones directas del nivel freático ni de la presión de poros mediante piezómetros u otro tipo de instrumentación

hidrogeológica. Durante la campaña de campo tampoco se contó con información que permitiera establecer de manera cuantitativa la posición de una superficie freática dentro de las secciones evaluadas.

En consecuencia, en los modelos finales desarrollados mediante Slide V6.004 se adoptó la configuración Water Surface = None, por lo que no se incorporó una superficie freática activa ni un modelo de presión de poros en los análisis estáticos y pseudoestáticos. Esta configuración se mantuvo de manera uniforme en las tres secciones analizadas: cresta, zona media y pie del talud. Las capturas finales de los seis escenarios de modelamiento muestran esta condición.

La condición adoptada debe interpretarse como un escenario de modelamiento sin presión de poros incorporada, y no como demostración de que el terreno se encuentre completamente seco o que no exista agua en profundidad. Los contenidos de humedad determinados mediante ASTM D2216 corresponden al agua presente en las muestras al momento del muestreo, pero no permiten determinar por sí solos una línea freática ni cuantificar la presión intersticial existente dentro del talud.

Debido a la ausencia de información piezométrica, no se realizó un análisis específico de sensibilidad del factor de seguridad frente a variaciones del nivel freático o de la presión de poros. Incorporar arbitrariamente una superficie de agua sin respaldo de campo habría introducido una condición hidráulica no verificada. Por tanto, los factores de seguridad obtenidos representan exclusivamente las condiciones de modelamiento adoptadas y no permiten cuantificar el efecto que una eventual saturación, infiltración o elevación del nivel freático produciría sobre la estabilidad.

Esta condición constituye una limitación de la investigación. Para estudios posteriores se recomienda complementar la caracterización mediante instalación de piezómetros, monitoreo estacional del nivel de agua y evaluación hidrogeológica, de modo que puedan definirse escenarios hidráulicos sustentados y analizarse la sensibilidad del factor de seguridad ante cambios de presión de poros.

3.3.2.12. Selección del coeficiente pseudoestático

En el análisis determinístico se utilizó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00. El valor de kh se determinó mediante el criterio kh = 0.50 × Z, adoptando Z = 0.35 para la ubicación del área de análisis. El fundamento teórico y bibliográfico que acompaña a este criterio se describe en el apartado 2.3.13.

El coeficiente kh = 0.175 se mantuvo constante en los modelos determinísticos de la cresta, zona media y pie del talud desarrollados en Slide V6.004; posteriormente, su influencia sobre el factor de seguridad fue evaluada mediante el análisis de sensibilidad. En la simulación Monte Carlo pseudoestática, kh se consideró como variable de entrada mediante una distribución de escenario VosePERT, con un valor mínimo de 0.000, un valor más probable de 0.175 y un valor máximo de 0.350, manteniéndose kv = 0.00.

3.3.2.13. Configuración del modelo de estabilidad en Slide

La estabilidad fue analizada con el programa Slide V6.004, a partir de modelos bidimensionales de equilibrio límite. La geometría fue idealizada a partir de una primera aproximación (reconocimiento de campo) y mediciones de las dimensiones referenciales del talud realizadas directamente de forma manual. Se consultó información físico-espacial y topográfica del barrio La Recoleta que sirviera para contextualizar la forma del área (Vargas Franco, 2020). La geometría del talud fue mantenida para los modelos de cresta, de zona media y de pie, siendo común para todos para controlar su influencia y comparar posteriormente el efecto de los parámetros geotécnicos en el FS.

La información secundaria sirvió como referencia del entorno, mientras que la idealización geométrica del modelo se sustentó en las mediciones efectuadas en campo.

A cada sección se le asignaron los valores de cohesión c, ángulo de fricción interna φ y peso unitario γ determinados mediante ensayos experimentales. La resistencia al corte se modeló conforme al criterio de Mohr-Coulomb, coherente con los resultados obtenidos del ensayo de corte directo y la caracterización física de las muestras estudiadas.

Aunque en el marco teórico se describen métodos de equilibrio límite como Fellenius, Bishop y Janbu, los factores de seguridad finales reportados en esta investigación fueron calculados con el método de Spencer. Por tanto, dichos métodos se mantienen únicamente como parte del sustento teórico y no se presentan como métodos adicionales ejecutados para los resultados finales. El método de Spencer fue seleccionado como método de referencia porque satisface simultáneamente el equilibrio de fuerzas y de momentos de la masa potencialmente deslizante, proporcionando un criterio único y uniforme para comparar las tres secciones y las dos condiciones de análisis.

En términos conceptuales, Fellenius emplea una formulación simplificada en la que no se consideran las fuerzas entre dovelas; Bishop Simplificado incorpora el equilibrio de momentos y simplifica las fuerzas entre dovelas; Janbu Simplificado se

fundamenta principalmente en el equilibrio de fuerzas; mientras que Spencer impone simultáneamente el equilibrio global de fuerzas y momentos. Debido a estas diferencias de formulación, distintos métodos pueden producir factores de seguridad ligeramente diferentes para una misma geometría. En consecuencia, para evitar mezclar criterios de cálculo, todos los factores de seguridad determinísticos utilizados como resultados principales se interpretaron con Spencer.

La búsqueda de la superficie potencial de falla se realizó considerando superficies circulares mediante el procedimiento Grid Search. La masa deslizante se dividió en 25 dovelas verticales y, para cada escenario, se identificó como superficie crítica aquella asociada al menor factor de seguridad obtenido dentro de la búsqueda, correspondiente al Global Minimum reportado por Slide V6.004. La dirección de falla configurada fue de derecha a izquierda (Right to Left).

El cálculo del factor de seguridad se desarrolló mediante un procedimiento iterativo, considerando una tolerancia de convergencia de 0.005 y un máximo de 50 iteraciones por superficie. Estos parámetros se mantuvieron constantes en todos los escenarios evaluados para garantizar uniformidad en el procedimiento de comparación.

En la condición estática actuó el peso propio del terreno, sin incorporación de fuerza sísmica equivalente, por lo que kh = 0.00 y kv = 0.00. En la condición pseudoestática se incorporó kh = 0.175 y se mantuvo kv = 0.00. No se incorporaron cargas externas concentradas o distribuidas ni elementos de refuerzo en los modelos analizados; por tanto, la comparación se centró en el peso propio, las propiedades resistentes y, para el escenario pseudoestático, la acción inercial horizontal equivalente.

La condición hidráulica se mantuvo uniforme en los seis modelos principales. En Slide V6.004 se empleó Water Surface = None, por lo que no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros. Esta configuración corresponde al escenario de modelamiento adoptado ante la ausencia de mediciones piezométricas directas y no constituye una demostración de ausencia de agua en profundidad.

Respecto de las condiciones de frontera, el análisis se efectuó dentro del contorno exterior (External Boundary) definido para la sección bidimensional, manteniendo los límites inferiores y laterales fuera de la superficie crítica identificada. Las superficies circulares de búsqueda intersectaron el perfil del terreno dentro de dicho contorno y fueron evaluadas en la dirección de falla establecida. Al tratarse de un análisis por

equilibrio límite y no de un análisis de deformaciones por elementos finitos, no se impusieron restricciones cinemáticas de desplazamiento en los bordes; la frontera delimita la masa geométrica disponible para la búsqueda de superficies de falla.

El mismo método de Spencer y la misma configuración general del modelo se conservaron en el análisis de sensibilidad desarrollado en Slide V6.004. En dicho análisis se modificaron individualmente la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en los escenarios pseudoestáticos, el coeficiente sísmico horizontal, manteniendo constantes las demás variables. La simulación Monte Carlo complementaria se desarrolló posteriormente en ModelRisk mediante una aproximación lineal local construida a partir de los resultados determinísticos y de sensibilidad obtenidos previamente en Slide V6.004; por ello, no representa la ejecución de un método de equilibrio límite diferente.

La Tabla 6 resume la configuración general utilizada en los modelos determinísticos y de sensibilidad, con la finalidad de hacer explícitos los parámetros necesarios para reproducir el procedimiento de análisis.

Tabla 6

Configuración general del análisis de estabilidad en Slide V6.004

Parámetro de modelamiento	Configuración utilizada
Software	Slide V6.004 - Rocscience
Tipo de análisis	Equilibrio límite bidimensional
Método de cálculo de FS	Spencer
Modelo de resistencia	Mohr-Coulomb
Tipo de superficie de falla	Circular
Método de búsqueda	Grid Search
Superficie adoptada	Global Minimum (menor FS de la búsqueda)
Número de dovelas	25 dovelas verticales
Tolerancia de convergencia	0.005
Máximo de iteraciones	50 por superficie
Dirección de falla	Right to Left
Geometría representativa	Altura vertical: 9.060 m; proyección horizontal: 5.081 m; longitud inclinada: 10.377 m
Condición hidráulica	Water Surface = None; sin presión de poros incorporada

Condición estática	kh = 0.00; kv = 0.00
Condición pseudoestática base	kh = 0.175; kv = 0.00
Cargas externas adicionales	No incorporadas
Elementos de refuerzo	No incorporados
Unidades	Sistema métrico

Nota. La configuración se mantuvo uniforme para la comparación de las secciones de cresta, zona media y pie. Los factores de seguridad reportados como resultados finales corresponden al método de Spencer.

3.3.2.14. Instrumentos de recolección y procesamiento de datos

La investigación permitió registrar y procesar la información obtenida durante las etapas de campo, laboratorio y gabinete. Su selección estuvo relacionada con las actividades efectivamente desarrolladas para la caracterización geotécnica de las secciones de cresta, zona media y pie del talud.

Durante la fase de campo, se utilizaron las fichas de registro de calicatas, cinta métrica y registro fotográfico mediante dispositivo móvil. Las muestras que se obtuvieron se colocaron en bolsas e identificaron por medio de una etiqueta conforme al código de la calicata y la profundidad de la muestra. La ubicación espacial del área objeto de estudio y de los puntos de exploración se fijó y materializó con apoyo en Google Earth, herramienta que también sirvió como punto de referencia para la representación geométrica de las secciones consideradas ante el modelamiento.

Los ensayos de laboratorio se realizaron en las instalaciones de la Universidad Católica de Santa María. La determinación de las propiedades físicas y mecánicas del suelo requirió una balanza con sensibilidad de 0.1 g, horno, tamices, equipo para límites de Atterberg, picnómetro, recipiente cilíndrico metálico de volumen conocido y equipos de permeabilidad y corte directo. El recipiente cilíndrico se utilizó en los ensayos de densidad máxima y mínima, por lo que su identificación correspondió a esta función y no a la de un molde Proctor.

Durante el trabajo de gabinete, los datos de campo y laboratorio se organizaron y procesaron en hojas de cálculo. El modelado bidimensional de estabilidad se realizó en Slide V6.004 y la simulación Monte Carlo complementaria se llevó a cabo en ModelRisk. La interpretación espacial y geométrica del área de estudio se realizó con Google Earth.

Como sustento documental, se incluyeron en los anexos la constancia de los ensayos emitida por la Universidad Católica de Santa María, las fichas y los resultados

de laboratorio, así como el registro fotográfico correspondiente.

Tabla 7

Instrumentos de recolección y procesamiento de datos

Etapa	Instrumento / herramienta	Finalidad
Campo	Ficha de registro de calicatas	Registrar ubicación, profundidad, descripción del perfil expuesto y niveles de muestreo.
	Cinta métrica	Controlar la profundidad y las dimensiones de la excavación.
	Dispositivo móvil - cámara	Realizar el registro fotográfico de las calicatas, perfiles y toma de muestras.
	Bolsas para muestras y rotulado	Almacenar e identificar las muestras según código de calicata y profundidad.
Campo / gabinete	Google Earth	Apoyar la ubicación espacial del área de estudio y la representación geométrica de las secciones analizadas.
Laboratorio	Balanza (sensibilidad 0.1 g)	Determinar las masas requeridas en los ensayos de laboratorio.
	Horno	Realizar el secado de muestras para la determinación del contenido de humedad y otros procedimientos.
	Tamices	Determinar la distribución granulométrica del suelo.
	Equipo para límites de Atterberg	Determinar el límite líquido y el límite plástico.
	Picnómetro	Determinar la gravedad específica de los sólidos del suelo.
	Recipiente cilíndrico metálico de volumen conocido	Ejecutar los procedimientos de densidad máxima y mínima.
	Equipo de permeabilidad	Determinar el coeficiente de permeabilidad de las muestras ensayadas.
	Equipo de corte directo	Determinar los parámetros de resistencia al corte empleados en el modelamiento.
Gabinete	Hojas de cálculo	Organizar y procesar los resultados de campo y laboratorio.
	Slide V6.004	Desarrollar el análisis bidimensional de estabilidad estático y pseudoestático.
	ModelRisk	Desarrollar la simulación Monte Carlo complementaria.

Nota. Se consignan únicamente los instrumentos, herramientas y programas utilizados en las actividades ejecutadas en campo, laboratorio y gabinete.

3.3.2.15. Procedimiento metodológico de la investigación

Se desarrolló de manera secuencial, integrando actividades de revisión documental, trabajo de campo, ensayos de laboratorio, procesamiento de datos, modelamiento geotécnico y análisis de resultados. Estas etapas permitieron evaluar la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta.

En primer lugar, se realizó la revisión de información relacionada con la zona de estudio, incluyendo antecedentes geológicos, condiciones geomorfológicas, información sísmica referencial, normativa técnica aplicable y estudios vinculados a la estabilidad de taludes. Esta revisión permitió contextualizar el problema de investigación y definir los criterios técnicos para el desarrollo del análisis.

Posteriormente, se efectuó el reconocimiento de campo del área de estudio, identificando las condiciones generales del talud y delimitando tres zonas representativas: cresta, zona media y pie. En esta etapa también se consideró el alcance de la comunicación formal presentada ante la Autoridad Nacional del Agua – Administración Local del Agua Chili, debido a que la toma de muestras se realizó mediante excavaciones manuales superficiales con fines de investigación.

Las calicatas fueron ejecutadas en los puntos marcados en el plan, con unas dimensiones aproximadas de 1,00 m × 1,00 m y una profundidad máxima esperada de 1,50 m. En las zonas de cresta y en la zona media se alcanzó más o menos dicha profundidad; sin embargo, en el pie del talud solo se logró excavar hasta aproximadamente 1,00 m debido a la presencia de cantos, bloques y material grueso relacionado con los depósitos aluviales próximos al río Chili.

Los perfiles del suelo fueron descritos visualmente durante la ejecución de la calicata, anotados fotográficamente y, simultáneamente, se extrajeron, rotularon y conservaron las muestras representativas para el transporte al laboratorio, permitiendo identificar y relacionar las condiciones estratigráficas superficiales y mantener la trazabilidad de las muestras con sus puntos de procedencia.

Los análisis en laboratorio consistieron en determinar el contenido de humedad, la granulometría, los límites de Atterberg (líquidos y plásticos), la gravedad específica, densidades máxima y mínima, peso unitario y la clasificación SUCS, entre otros. La resistencia al esfuerzo cortante fue determinada mediante corte directo, del cual se obtuvieron la cohesión y el ángulo de fricción interna, parámetros necesarios para los

cálculos de análisis geotécnico.

Con los resultados de laboratorio, se realizó el procesamiento de datos en gabinete. En esta etapa se organizaron los resultados por calicata y por zona del talud, identificando la variación de los parámetros geotécnicos entre la cresta, zona media y pie. Esta información fue empleada como base para la construcción de los modelos bidimensionales de estabilidad.

El modelamiento se realizó en Slide V6.004, empleando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y el método de equilibrio límite de Spencer para calcular los factores de seguridad reportados. Se evaluaron dos escenarios de análisis: condición estática y condición pseudoestática. Para el escenario pseudoestático se empleó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron interpretados mediante la comparación de factores de seguridad, margen de seguridad, reducción porcentual, análisis de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria mediante ModelRisk. Esta secuencia permitió relacionar la variabilidad de los parámetros geotécnicos con el comportamiento de estabilidad de las secciones representativas del talud.

3.3.2.16. Análisis de datos

Comprendió la organización, el procesamiento y la interpretación de la información de campo, laboratorio y gabinete. Inicialmente, los registros de las calicatas se agruparon según su procedencia: cresta, zona media y pie del talud. Esta clasificación permitió vincular cada muestra con su ubicación, profundidad aproximada de extracción, descripción visual y resultados de los ensayos.

Los resultados de los ensayos de laboratorio fueron procesados para determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Entre los parámetros principales se consideraron la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, debido a que estos intervienen directamente en el análisis de estabilidad mediante el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Asimismo, se consideraron los resultados de humedad, granulometría, límites de Atterberg y clasificación SUCS para complementar la caracterización geotécnica del material.

Posteriormente, los parámetros geotécnicos fueron ingresados en el software Slide V6.004, donde se desarrollaron los modelos bidimensionales de estabilidad para las tres secciones representativas del talud. El cálculo del factor de seguridad se realizó bajo

condición estática y condición pseudoestática, utilizando el método de equilibrio límite de Spencer para obtener los factores de seguridad reportados.

En el análisis pseudoestático se incorporó el coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y el coeficiente vertical kv = 0.00. Estos valores permitieron evaluar la reducción del factor de seguridad frente a una acción sísmica horizontal simplificada y comparar los resultados respecto a la condición estática.

Los FS obtenidos fueron analizados mediante comparación entre secciones, cálculo del margen de seguridad y determinación de la reducción porcentual entre los escenarios estático y pseudoestático. El margen de seguridad se calculó como la diferencia entre el FS obtenido y el valor de referencia FS = 1.00, permitiendo identificar las condiciones más críticas dentro del área evaluada.

Se desarrolló un análisis de sensibilidad con la finalidad de evaluar cómo la variación individual de los parámetros geotécnicos modifica el factor de seguridad. Para ello, se consideraron variaciones en la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario; en la condición pseudoestática se evaluó adicionalmente la variación del coeficiente sísmico horizontal kh.

Finalmente, se ejecutó en ModelRisk una simulación Monte Carlo complementaria con 10 000 realizaciones por escenario. Los parámetros de entrada variaron simultáneamente conforme a los rangos y las distribuciones VosePERT establecidos. La distribución del factor de seguridad se describió mediante la media, la mediana, la desviación estándar, el coeficiente de variación, los percentiles P5 y P95 y la proporción de realizaciones con FS < 1.00. La sensibilidad estadística se examinó mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. La interpretación de estos indicadores se limitó a los escenarios modelados, sin extender sus resultados a inferencias estadísticas poblacionales.

El análisis de datos permitió vincular los parámetros geotécnicos obtenidos experimentalmente con la estabilidad de las secciones representativas del talud. Para ello, se integraron los resultados determinísticos y de sensibilidad calculados en Slide V6.004 con la simulación Monte Carlo desarrollada en ModelRisk. Esta integración amplió la interpretación de la distribución del FS y de la sensibilidad de la respuesta, dentro de los rangos y las distribuciones definidos para el estudio.

3.3.2.17. Control de calidad y consistencia de la información

Se centró en verificar la trazabilidad de la información de campo, laboratorio y gabinete. Se revisó la identificación de cada muestra según la calicata de procedencia, la zona del talud, la profundidad aproximada y la fecha de extracción. Esta verificación permitió vincular los resultados de laboratorio con sus respectivos puntos de exploración.

En campo, el registro fotográfico, la descripción visual de los perfiles estratigráficos, el rotulado de las muestras y la codificación correlativa de las calicatas respaldaron la consistencia de los datos. Estos registros facilitaron la detección de errores de identificación y la comprobación de la procedencia de las muestras de la cresta, la zona media y el pie del talud.

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con las normas ASTM para cada una de las propiedades a evaluar. Una vez obtenidos los resultados, se revisaron los registros de los ensayos para identificar resultados contradictorios, resultados fuera de rango y errores en la transcripción.

La información obtenida fue organizada en planillas y posteriormente contrastada con los reportes de laboratorio, los registros de campo y las fotografías disponibles. Los valores de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario fueron incorporados en Slide V6.004 para desarrollar el análisis bidimensional de estabilidad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Asimismo, la revisión comprendió la comparación entre secciones, la verificación del margen de seguridad, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo complementaria en ModelRisk.

El control aplicado correspondió a una revisión técnica de la trazabilidad y consistencia de los datos geotécnicos y de su procesamiento. Este procedimiento permitió reducir errores de identificación, transcripción y cálculo, pero no incrementó la representatividad espacial de los resultados ni constituyó una validación estadística de instrumentos.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se exponen, analizan e interpretan los resultados obtenidos de la exploración de campo, la realización de ensayos de laboratorio, el modelamiento bidimensional mediante Slide V6.004, el análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo realizada mediante ModelRisk. Los resultados se estructuran atendiendo a los objetivos específicos de la investigación de forma que se evalúe cómo la variabilidad de las propiedades geotécnicas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, afecta a la estabilidad bidimensional ante condiciones estáticas y pseudoestáticas.

El análisis se desarrolla de manera progresiva. Se caracterizan las propiedades geotécnicas del suelo mediante excavaciones de reconocimiento y ensayos de laboratorio. Seguidamente, se exponen los resultados del análisis de estabilidad bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Finalmente, se interpreta la influencia de los parámetros geotécnicos mediante comparación de factores de seguridad, margen de seguridad, análisis de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria.

4.1. Caracterización de la variabilidad geotécnica de los taludes del barrio La Recoleta – río Chili, Arequipa 2026.

La caracterización de la variabilidad geotécnica constituyó la primera etapa del análisis, debido a que permitió identificar diferencias en las propiedades físicas y mecánicas del suelo entre las zonas representativas del talud. Para ello, se integraron los registros de las calicatas ejecutadas en la cresta, zona media y pie del talud con los resultados de laboratorio obtenidos en las muestras correspondientes. Esta información permitió definir los parámetros de entrada para el modelamiento bidimensional de estabilidad, principalmente la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, y sustentar la posterior comparación de las secciones bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas

4.1.1. *Distribución espacial de las calicatas*

Se ejecutaron nueve calicatas distribuidas en tres sectores de exploración a lo largo del área de estudio. En cada sector se ubicó una calicata en la cresta, una en la zona media y una en el pie del talud. Esta distribución permitió obtener información de las distintas posiciones geomorfológicas y relacionar los resultados de laboratorio con la zona de procedencia de cada muestra.

Los puntos de exploración se seleccionaron considerando la accesibilidad, la

representatividad geomorfológica, la seguridad de la excavación manual y la distribución de los sectores del talud. Con estos criterios se buscó cubrir las condiciones superficiales del terreno dentro del alcance aprobado y comunicado para la campaña de campo.

Figura 12

Ubicación de calicatas



Nota. Mapeo de calicatas realizadas en campo. Tomada de Google Earth, 2026.

La Figura 12 muestra la distribución de las nueve calicatas a lo largo de las tres posiciones geomorfológicas que presenta el talud, de donde se extraen tres calicatas en cresta, tres en la zona media y tres en pie. Esta disposición de las calicatas fue suficiente para poder analizar las condiciones superficiales de cada lugar y localizar diferencias en las propiedades geotécnicas a través de los resultados de laboratorio.

La Tabla 8 ordena los registros de las calicatas incorporando la fecha de ejecución, las coordenadas UTM y la profundidad máxima de las calicatas. Estos datos permitieron localizar los puntos de exploración, fijar la cobertura espacial y establecer la profundidad del muestreo, cuestiones que fundamentan el análisis de la variabilidad geotécnica dentro de los límites del presente estudio.

Tabla 8

Distribución espacial de las calicatas ejecutadas en los taludes del barrio La Recoleta

Calicata	Zona del talud	Fecha	Coordenadas UTM – Zona 19K	Prof. máx. (m)
C-01	Cresta	18/11/2025	E: 228 773.41 m; N: 8 185 784.55 m	1.50
C-02	Cresta	20/11/2025	E: 228 617.29 m; N: 8 185 565.09 m	1.50
C-03	Cresta	20/11/2025	E: 228 744.00 m; N: 8 185 698.00 m	1.50

C-04	Zona media	19/11/2025	E: 228 775.44 m; N: 8 185 782.46 m	1.50
C-05	Zona media	20/11/2025	E: 228 619.00 m; N: 8 185 562.00 m	1.50
C-06	Zona media	20/11/2025	E: 228 745.00 m; N: 8 185 696.00 m	1.50
C-07	Pie	19/11/2025	E: 228 777.05 m; N: 8 185 781.49 m	1.00
C-08	Pie	19/11/2025	E: 228 621.00 m; N: 8 185 560.00 m	1.00
C-09	Pie	19/11/2025	E: 228 746.00 m; N: 8 185 695.00 m	1.00

Nota. Las coordenadas corresponden al sistema UTM, zona 19K. La información fue obtenida durante la campaña de exploración geotécnica realizada en noviembre de 2025. Elaboración propia con base en los registros de campo.

Del análisis de la Tabla 8 se observa que las calicatas fueron distribuidas en las tres zonas representativas del talud. En la cresta y zona media se alcanzó una profundidad aproximada de 1.50 m, mientras que en el pie del talud la profundidad fue aproximadamente de 1.00 m, debido a la presencia de cantos, bloques y material grueso asociado a los depósitos aluviales próximos al río Chili.

La distribución posibilitó extraer información representativa de los estratos superficiales del talud y establecer una línea de comparación entre las zonas donde se ha realizado la evaluación. Los resultados de las calicatas representaron el punto de partida para la interpretación de la variabilidad geotécnica y la definición de los parámetros a introducir en el modelamiento bidimensional de la estabilidad.

4.1.2. *Características de las calicatas*

Las calicatas permitieron el estudio de los estratos superficiales de la cresta, de la zona media y del pie del talud. En cada calicata, se registraron la profundidad alcanzada, la forma visual del suelo, la presencia de finos, gravas, bloques, cantos y las condiciones que favorecieron el avance manual.

En la cresta, las calicatas C-01, C-02 y C-03 alcanzaron 1,50 m de profundidad. La calicata aquí realizada permitió caracterizar los materiales de la parte superior del talud y obtener muestras representativas para su posterior evaluación en laboratorio.

En la zona media, las calicatas C-04, C-05 y C-06 alcanzaron también 1,50 m de profundidad. Los registros y las muestras correspondientes a este sector permitieron

complementar la caracterización de la cresta y la obtención de información para contrastar las propiedades físicas y los parámetros de resistencia entre ambas zonas.

En el pie del talud se ejecutaron las calicatas C-07, C-08 y C-09, alcanzándose una profundidad aproximada de 1.00 m. La menor profundidad obtenida en esta zona se debió a la presencia de cantos, bloques y material grueso asociado a los depósitos aluviales próximos al río Chili, lo que limitó el avance de la excavación manual. Esta condición fue registrada como una característica propia del terreno y considerada en la interpretación de los resultados. La información obtenida en las calicatas permitió diferenciar las condiciones geotécnicas superficiales de cada zona y establecer la base para la caracterización del suelo. Asimismo, los datos de campo fueron complementados con los resultados de laboratorio, permitiendo definir los parámetros de entrada utilizados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad mediante Slide V6.004.

Las muestras fueron seleccionadas considerando su representatividad respecto de las condiciones identificadas en cada zona. La selección no se basó exclusivamente en el valor máximo o mínimo de un único parámetro; sin embargo, cuando correspondía, se priorizaron condiciones comparativamente desfavorables reconocidas durante la caracterización geotécnica previa.

Tabla 9

Características de las calicatas ejecutadas en los taludes del barrio La Recoleta

Calicata	Zona del talud	Estratos definidos (m)	Tipo de suelo preliminar (campo)	Nº muestras D*
C-01	Cresta	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Arenas limosas y limos arenosos con gravas finas; material de relleno / aluvial heterogéneo.	3
C-02	Cresta	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Secuencia arenosa limosa (SM–ML) con presencia de gravas y bloques subangulosos hacia la base.	3
C-03	Cresta	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Suelo arenoso limoso marrón, con niveles con cantos y bloques grandes en 0.50–1.50 m.	3
C-04	Zona media	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Arenas finas a medias limosas, relativamente limpias, de compacidad media (depósito aluvial).	3
C-05	Zona media	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Arena limosa marrón claro, con incremento de finos hacia la base; algunas gravas dispersas.	3

C-06	Zona media	0–0.50; 0.50–1.00; 1.00–1.50	Arena limosa a limo arenoso compacto, con raíces y algo de materia orgánica superficial.	3
C-07	Pie	0–0.50; 0.50–1.00	Arena limosa marrón oscura con gravas; hacia 1.00 m aparecen cantos grandes que limitan la zanja.	2
C-08	Pie	0–0.50; 0.50–1.00	Arena limosa fina, color marrón claro, de compacidad media; matriz relativamente uniforme.	2
C-09	Pie	0–0.50; 0.50–1.00	Limo arcilloso / limo arenoso marrón muy oscuro, con raíces y mayor humedad en el pie del talud.	2

Nota. Información de campo.

Los resultados muestran que la cresta del talud presenta predominantemente arenas limosas y limos arenosos con presencia de gravas y bloques subangulosos, evidenciando depósitos relativamente gruesos. En la zona media predominan arenas limosas con incremento gradual del contenido de finos, mientras que el pie del talud presenta materiales con mayor contenido de partículas finas, humedad natural y presencia de raíces.

Asimismo, se observa que la cresta y la zona media presentan una configuración estratigráfica semejante, mientras que el pie del talud muestra una transición hacia materiales más finos, condición que evidencia una mayor variabilidad geotécnica y un posible comportamiento mecánico diferente respecto a las zonas superiores.

Estos resultados evidencian diferencias geotécnicas superficiales entre las zonas y puntos evaluados, justificando el análisis diferenciado de las tres secciones representativas durante la evaluación de la estabilidad del talud.

4.1.3. *Mapeo geotécnico de campo y perfiles esquemáticos del talud*

Se desarrolló a partir del reconocimiento superficial del área de estudio y de la información obtenida durante la ejecución de las nueve calicatas distribuidas en la cresta, zona media y pie del talud. Para cada punto de exploración se consideró la ubicación, profundidad alcanzada, secuencia estratigráfica y características visuales de los materiales, incluyendo la presencia de fracciones finas, arenas, gravas, cantos y bloques, así como cambios de textura, color y humedad aparente. Esta información permitió establecer una diferenciación geotécnica superficial de los materiales presentes en las tres zonas evaluadas.

La interpretación de campo fue posteriormente contrastada con los resultados de caracterización física obtenidos en laboratorio, principalmente granulometría, contenido de humedad, límites de Atterberg y clasificación SUCS. De esta manera, el mapeo no se sustentó exclusivamente en la clasificación de laboratorio, sino en la integración de las observaciones directas realizadas en las calicatas con los resultados de los ensayos correspondientes.

Los perfiles esquemáticos de las calicatas permiten representar de manera gráfica las condiciones estratigráficas superficiales observadas durante la excavación manual. Estos perfiles fueron elaborados a partir de la descripción visual de campo, el registro fotográfico y la identificación de los materiales presentes en cada punto de exploración.

En dichos perfiles se consideraron aspectos como la profundidad alcanzada, la presencia de material fino, gravas, cantos, bloques, variaciones de textura, cambios de color y condiciones generales del suelo. Esta información permitió complementar la caracterización de campo y relacionar cada calicata con los resultados obtenidos posteriormente en laboratorio.

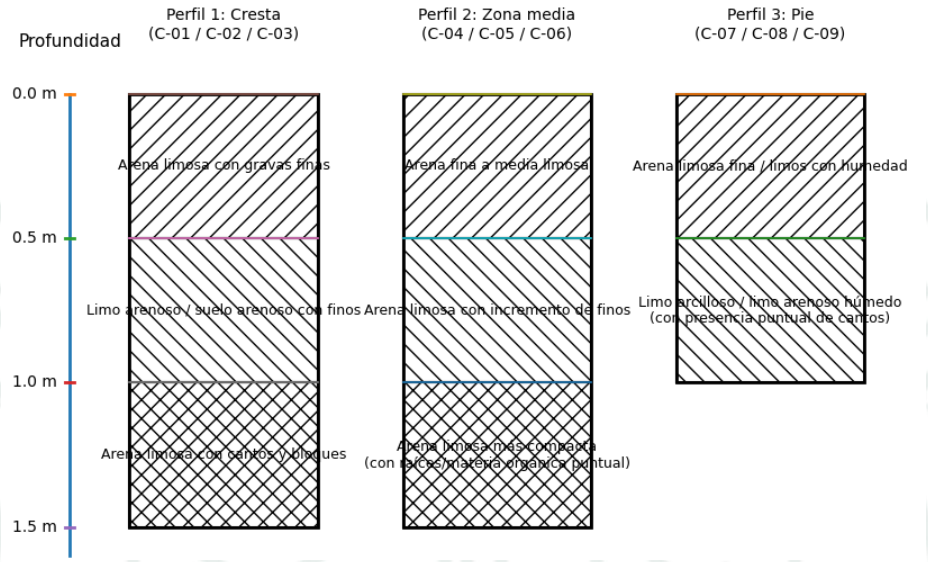
En la cresta y la zona media, las calicatas permitieron describir los perfiles superficiales hasta aproximadamente 1.50 m de profundidad. En el pie del talud, la excavación alcanzó aproximadamente 1.00 m, donde la presencia de cantos, bloques y otros materiales gruesos de los depósitos aluviales próximos al río Chili limitó el avance.

Debe precisarse que estos perfiles corresponden a una representación esquemática de las condiciones observadas durante la exploración superficial, por lo que no constituyen perfiles geotécnicos profundos ni reemplazan estudios mediante perforaciones mecánicas. Sin embargo, permiten sustentar la diferenciación de materiales entre la cresta, zona media y pie del talud, y sirven como base para la interpretación de la variabilidad geotécnica superficial del área de estudio.

Los perfiles esquemáticos fueron utilizados como información complementaria para organizar los resultados de laboratorio y definir los parámetros geotécnicos empleados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

Figura 13

Perfiles esquemáticos geotécnicos del talud: Cresta - Zona media - Pie



Nota. Perfiles con escala de profundidad, estratos delimitados y rotulación geotécnica para comparación espacial.

Del análisis de la Figura 13 se observa que la cresta y la zona media presentan perfiles superficiales con mayor continuidad estratigráfica hasta una profundidad aproximada de 1.50 m, mientras que el pie del talud evidencia mayor presencia de cantos, bloques y material grueso asociado a depósitos aluviales próximos al río Chili. Esta condición explica que en las calicatas ubicadas en el pie del talud la profundidad alcanzada haya sido aproximadamente de 1.00 m.

La selección de las muestras destinadas al ensayo de corte directo se realizó mediante un criterio técnico intencional y progresivo, considerando la caracterización física previamente desarrollada, la ubicación de las muestras dentro del talud, la profundidad de extracción, las características granulométricas y de clasificación, el contenido de humedad y la disponibilidad de material adecuado para el ensayo. Bajo estos criterios se seleccionaron las muestras C-01 a 0.50 m para la cresta, C-05 a 0.50 m para la zona media y C-08 a 1.00 m para el pie del talud.

Las muestras fueron seleccionadas considerando su representatividad respecto de las condiciones identificadas en cada zona. La selección no se basó exclusivamente en el valor máximo o mínimo de un único parámetro geotécnico; sin embargo, cuando

correspondía, se priorizaron condiciones comparativamente desfavorables reconocidas durante la caracterización previa. El procedimiento de selección, acondicionamiento y ejecución del ensayo de corte directo se describe en el Capítulo III de la investigación.

La selección de estas tres muestras no tuvo como finalidad realizar una caracterización estadística de todas las calicatas mediante corte directo, sino obtener parámetros resistentes representativos de cada zona principal del talud. Los valores obtenidos de cohesión y ángulo de fricción interna fueron posteriormente empleados como parámetros de entrada en el criterio Mohr-Coulomb para el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004.

La integración de la información de campo con los resultados de laboratorio permitió establecer una correspondencia entre los materiales observados en las calicatas y su comportamiento geotécnico. En la cresta se identificaron principalmente arenas limosas y limos arenosos con presencia variable de gravas, cantos y bloques; en la zona media predominaron arenas limosas y arenas finas a medias con incremento local del contenido de finos; mientras que en el pie del talud se reconocieron arenas limosas, materiales más finos, sectores con mayor humedad y presencia de cantos y bloques asociados al depósito aluvial próximo al río Chili. Estas observaciones fueron contrastadas mediante los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, clasificación SUCS, propiedades físicas y, para las muestras representativas seleccionadas, ensayo de corte directo.

Tabla 10

Integración entre mapeo de campo y ensayos geotécnicos

Zona	Calicatas	Material predominante observado en campo	Clasificación de laboratorio	Muestra mecánica representativa	γ (kN/m³)	c′ (kPa)	φ′ (°)	Interpretación
Cresta	C-01, C-02, C-03	Arenas limosas y limos arenosos, con gravas, cantos y bloques; material heterogéneo superficial	Predominio de SM y SP-SM	C-01	12.78	14.64	27.94	Material granular con fracción limosa y heterogeneidad superficial; presenta el menor peso unitario de las tres secciones y parámetros resistentes propios de la muestra representativa ensayada.
Zona media	C-04, C-05, C-06	Arenas finas a medias limosas y arenas limosas, con incremento local de finos y algunas gravas dispersas	Predominio de SM y SP-SM	C-05	15.57	0.85	33.36	Material predominantemente friccional; la muestra representativa presentó la menor cohesión y el mayor ángulo de fricción interna de las tres secciones.
Pie del talud	C-07, C-08, C-09	Arenas limosas y materiales finos, con mayor humedad local, raíces, gravas, cantos y bloques asociados al depósito aluvial	Predominio de SM y SP-SM	C-08	20.06	13.87	30.73	Zona con mayor peso unitario y presencia de materiales aluviales gruesos y finos; la muestra representativa presentó parámetros resistentes diferenciados respecto de las zonas superiores.

Nota. La determinación de los materiales se fundamentó en la observación directa durante la excavación de las calicatas y se complementó con la caracterización física y la clasificación SUCS. Los valores de c′ y φ′ se obtuvieron únicamente a partir de las muestras C-01, C-05 y C-08 por medio del corte directo, considerando una única determinación por zona. De ahí que no constituyan una representación estadística de todos los materiales disponibles en cada sector. La información presentada vincula técnicamente los registros de campo, los resultados de laboratorio y los parámetros utilizados para el modelamiento.

La comparación evidencia que las tres zonas presentan una composición predominantemente granular con presencia variable de finos limosos, aunque existen diferencias en la heterogeneidad, humedad y presencia de material grueso observadas durante la exploración. La clasificación SUCS permitió identificar un predominio de arenas limosas (SM) y arenas mal gradadas con limo (SP-SM), en concordancia con las descripciones realizadas durante la exploración de campo. Las muestras mecánicas representativas presentaron diferencias en sus parámetros resistentes: la zona media registró la menor cohesión efectiva, con $c' = 0.85$ kPa, y el mayor ángulo de fricción interna efectiva, con $\varphi' = 33.36°$, mientras que la cresta y el pie presentaron valores mayores de cohesión. Asimismo, el peso unitario aumentó de 12.78 kN/m³ en la cresta a 20.06 kN/m³ en el pie del talud.

Debido a que los parámetros resistentes c′ y φ′ provienen únicamente de tres determinaciones independientes, una por cada zona evaluada, no existe una base suficiente para establecer una correlación estadística entre el tipo de material y dichos parámetros. Por ello, la relación se interpretó mediante una comparación técnica descriptiva que integró el mapeo geotécnico, la clasificación SUCS y los resultados de los ensayos, asignándose posteriormente los parámetros representativos de cada zona a su correspondiente sección de modelamiento.

4.1.4. *Criterio de selección de muestras para los ensayos de laboratorio*

Los ensayos de laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo a la finalidad técnica de cada prueba, el volumen de material disponible, el grado de representatividad de las muestras y la zona del talud de origen. Por este motivo, no se realizaron todos los ensayos a la totalidad de las muestras tomadas, sino que se aplicó un criterio técnico de selección intencionado, priorizando aquellas que permitían hacer una buena representación de las condiciones de cresta, de zona media y de pie del talud.

El contenido de humedad se determinó en todas las muestras disponibles, debido a que el ensayo requería una cantidad reducida de material y permitía identificar

diferencias en las condiciones de humedad entre los puntos de exploración. Para la clasificación del suelo, los ensayos de densidad, de gravedad específica, de permeabilidad y de corte directo se seleccionaron muestras representativas, teniendo en cuenta los requerimientos de preparación, cantidad de material y condiciones de ejecución de cada procedimiento.

Esta distribución facilitó la organización de los resultados de acuerdo a los fines del estudio, que está centrado en caracterizar la variabilidad geotécnica superficial del talud y en la obtención de los parámetros de entrada para el modelamiento bidimensional de estabilidad.

Los fundamentos de la cantidad y distribución de los ensayos son presentados en el apartado 3.3.2.1.

Tabla 11

Resumen de muestras consideradas por tipo de ensayo

Ensayo	Número de muestras ensayadas	Criterio de selección
Contenido de humedad	24 muestras	Se aplicó a la totalidad de muestras disponibles para evaluar la variación natural de humedad.
Granulometría por tamizado	24 muestras	Se aplicó a las muestras disponibles para determinar la distribución de grava, arena y finos.
Densidad máxima y mínima	9 muestras	Se consideró una muestra representativa por calicata.
Límite líquido / límites de Atterberg	9 muestras	Se seleccionaron muestras representativas para evaluar plasticidad y clasificación.
Clasificación SUCS	9 muestras	Se emplearon muestras representativas con datos de granulometría, finos y plasticidad.
Gravedad específica	9 muestras	Se aplicó a muestras representativas para complementar la caracterización física.
Permeabilidad	3 muestras	Se seleccionó una muestra por zona del talud: cresta, zona media y pie.
Corte directo	3 muestras representativas	Se seleccionaron C-01, C-05 y C-08, correspondientes a cresta, zona media y pie. Cada muestra fue evaluada mediante tres especímenes sometidos a diferentes esfuerzos normales, aproximadamente

Ensayo	Número de muestras ensayadas	Criterio de selección
	(9 ejecuciones de corte: 3 esfuerzos normales por muestra)	50.11, 99.16 y 148.21 kPa, para construir la envolvente de falla y determinar c′ y φ′.

Nota. La cantidad y selección de muestras respondió a la finalidad técnica de cada ensayo, la representatividad zonal, la profundidad de extracción, la caracterización geotécnica previa y la disponibilidad de material. Para el corte directo se seleccionaron tres muestras representativas, cada una evaluada bajo tres esfuerzos normales, obteniéndose nueve ejecuciones de corte para la determinación de los parámetros resistentes de las tres secciones analizadas.

4.1.5. *Densidad máxima y mínima*

Se realizaron para determinar los límites de densidad seca de las muestras obtenidas durante la exploración geotécnica. Estos valores complementaron la caracterización física de los materiales granulares de la cresta, la zona media y el pie del talud, y permitieron comparar su capacidad de acomodo entre los estados suelto y denso.

El procedimiento se desarrolló conforme a las normas ASTM D4253 y ASTM D4254, empleando un recipiente cilíndrico metálico de volumen conocido. A partir de este procedimiento se obtuvieron los valores de densidad seca mínima y densidad seca máxima para las muestras correspondientes a las calicatas ejecutadas en el área de estudio.

Tabla 12

Densidad máxima y mínima

Calicata	ρmín (g/cm³)	ρmáx (g/cm³)
C-01	1.18	1.37
C-02	1.45	1.66
C-03	0.91	1.18
C-04	0.95	1.29
C-05	1.15	1.53
C-06	1.01	1.31
C-07	1.10	1.48
C-08	1.06	1.28
C-09	1.04	1.25

Nota. La tabla presenta los valores de densidad seca mínima y densidad seca máxima obtenidos a partir de las muestras recolectadas en las calicatas del área de estudio. El ensayo fue realizado empleando un recipiente cilíndrico metálico de volumen conocido, conforme a las normas ASTM D4253 y ASTM D4254.

Los resultados muestran que la masa volumétrica seca mínima varía entre 0.91 g/cm³ (calicata C-03) y 1.45 g/cm³ (calicata C-02), mientras que la masa volumétrica seca máxima presenta valores comprendidos entre 1.18 g/cm³ (calicata C-03) y 1.66 g/cm³ (calicata C-02). Esta variación evidencia diferencias en el arreglo natural de las partículas y en las características granulométricas de los materiales presentes en las distintas zonas del talud.

La Tabla 12 muestra diferencias en las densidades secas mínima y máxima de las muestras procedentes de las calicatas. La densidad seca mínima osciló aproximadamente entre 0.91 y 1.45 g/cm³, mientras que la máxima se situó entre 1.18 y 1.66 g/cm³. Estos rangos reflejaron diferencias en la capacidad de acomodo de las partículas, asociadas con las características físicas de los materiales de las distintas zonas del talud.

Los valores más altos de densidad se asocian a materiales con mayor acomodo de partículas y posible predominio de fracciones granulares, mientras que los valores más bajos pueden relacionarse con materiales de menor compacidad, mayor presencia de vacíos o variaciones en la granulometría. Estas diferencias son coherentes con la heterogeneidad observada durante la exploración de campo, donde se identificaron arenas, gravas, finos, cantos y bloques en distintos sectores del talud.

En términos geotécnicos, los resultados de densidad máxima y mínima permitieron complementar la interpretación del comportamiento físico del suelo y apoyar la estimación del peso unitario empleado posteriormente en el análisis de estabilidad. Por tanto, estos valores no se interpretan de manera aislada, sino como parte de la caracterización geotécnica general utilizada para definir los parámetros de entrada del modelamiento bidimensional en Slide V6.004.

Asimismo, la variación observada entre las muestras contribuye a sustentar la existencia de variabilidad geotécnica en el área de estudio. Esta información se integra posteriormente con los resultados de humedad, límites de Atterberg, clasificación SUCS, gravedad específica y corte directo para evaluar la influencia de los parámetros geotécnicos en la estabilidad estática y pseudoestática del talud.

4.1.6. *Límite líquido de los suelos*

El límite líquido corresponde al contenido de humedad en el cual el suelo pasa del estado plástico al estado líquido. Su determinación permitió complementar la

caracterización de la fracción fina de las muestras y evaluar las diferencias en su comportamiento frente a cambios en el contenido de humedad.

El ensayo se realizó sobre muestras representativas obtenidas de las calicatas correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud. Los resultados permitieron identificar diferencias en el comportamiento de los materiales finos presentes en las zonas evaluadas.

Tabla 13

Límite líquido de los suelos

Calicata	Código	Límite líquido (%)
1	H - 01	31.09
2	H - 05	23.39
3	H - 07	34.20
4	H - 11	36.90
5	H - 13	26.26
6	H - 18	26.70
7	H - 19	25.67
8	H - 22	28.60
9	H - 24	24.72

Nota. La tabla presenta los valores del límite líquido (LL) obtenidos conforme a la ASTM D4318, empleando el método de la copa de Casagrande.

Del análisis de la Tabla 13 se observa que los valores de límite líquido varían entre 23.39 % y 36.90 %. El valor mínimo corresponde a la muestra H-05, mientras que el valor máximo corresponde a la muestra H-11. Asimismo, se identifican valores intermedios en las demás muestras, lo cual evidencia diferencias en el comportamiento plástico de los materiales finos presentes en el área de estudio.

Los valores obtenidos corresponden a rangos bajos a moderados de límite líquido, por lo que no se evidencia un comportamiento altamente plástico en los suelos evaluados. Esta condición permite interpretar que los materiales presentan una respuesta limitada frente a cambios de humedad asociados a la plasticidad, aunque mantienen variaciones entre muestras debido a la proporción de finos y a la composición del material.

Desde el punto de vista geotécnico, las diferencias observadas en el límite líquido contribuyen a la caracterización de la variabilidad geotécnica del área de estudio. Las muestras con valores más altos, como H-07 y H-11, reflejan una mayor capacidad de retención de humedad dentro de la fracción fina, mientras que las muestras con valores menores, como H-05 y H-24, presentan menor plasticidad relativa.

Estos resultados permitieron complementar la clasificación de los suelos mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos y apoyar la interpretación de las propiedades físicas de los materiales evaluados. Sin embargo, el límite líquido no fue utilizado directamente como parámetro de entrada en el modelamiento de estabilidad en Slide V6.004, debido a que los parámetros principales para dicho análisis fueron la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario.

En conjunto con el contenido de humedad, granulometría, propiedades de plasticidad, clasificación SUCS y gravedad específica, el límite líquido permitió fortalecer la caracterización geotécnica de las muestras y sustentar la variabilidad de los materiales presentes en las zonas de cresta, zona media y pie del talud.

4.1.7. *Contenido de humedad*

El contenido de humedad permitió determinar la cantidad de agua presente en las muestras obtenidas durante la campaña de exploración geotécnica. Este parámetro complementó la caracterización física de los materiales y permitió identificar diferencias en las condiciones de humedad de las muestras correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud.

El contenido de humedad fue determinado conforme a la norma ASTM D2216, considerando muestras tomadas a diferentes profundidades en las calicatas ejecutadas en el área de estudio. Los resultados obtenidos permiten interpretar la variación de humedad en función de la ubicación de la muestra, la profundidad de extracción, la composición del material y la cercanía al cauce del río Chili.

Tabla 14

Ensayo de contenido de humedad natural (ASTM D2216)

N°	Calicata	Zona	Prof (m)	w (%)
1	C01	Cresta	0.5	15.80%
2	C01	Cresta	1	18.64%
3	C01	Cresta	1.5	10.01%
4	C02	Cresta	0.5	14.85%
5	C02	Cresta	1	5.19%
6	C02	Cresta	1.5	10.74%
7	C03	Cresta	0.5	22.00%
8	C03	Cresta	1	9.32%
9	C03	Cresta	1.5	4.96%
10	C04	Media	0.5	13.32%
11	C04	Media	1	18.17%
12	C04	Media	1.5	14.89%

13	C05	Media	0.5	23.50%
14	C05	Media	1	21.51%
15	C05	Media	1.5	22.17%
16	C06	Media	0.5	17.34%
17	C06	Media	1	18.39%
18	C06	Media	1.5	19.60%
19	C07	Pie	0.5	20.24%
20	C07	Pie	1	21.19%
21	C08	Pie	0.5	19.59%
22	C08	Pie	1	28.81%
23	C09	Pie	0.5	24.20%
24	C09	Pie	1	21.10%

Nota. La tabla presenta los resultados del contenido de humedad natural, w (%), obtenidos para las muestras recolectadas en las nueve calicatas del área de estudio. El ensayo fue desarrollado conforme a la norma ASTM D2216.

Del análisis de la Tabla 14 se observa que el contenido de humedad varía entre 4.96 % y 28.81 %. El valor mínimo corresponde a la muestra C03 a 1.50 m, ubicada en la zona de cresta, mientras que el valor máximo corresponde a la muestra C08 a 1.00 m, ubicada en el pie del talud. Esta diferencia evidencia una variación importante en las condiciones de humedad natural de los materiales evaluados.

En la zona de cresta, los valores de humedad presentan un promedio aproximado de 12.39 %, con registros que varían entre 4.96 % y 22.00 %. Estos valores reflejan condiciones de humedad variables en la parte superior del talud, asociadas a la exposición superficial del material, la profundidad de muestreo y la composición del suelo en cada calicata.

En la zona media, el contenido de humedad presenta un promedio aproximado de 18.77 %, con valores entre 13.32 % y 23.50 %. Esta zona muestra valores más uniformes que la cresta, especialmente en las calicatas C05 y C06, donde los contenidos de humedad se mantienen en rangos relativamente cercanos.

En el pie del talud, el contenido de humedad presenta el mayor promedio, con aproximadamente 22.52 %, y valores entre 19.59 % y 28.81 %. Esta condición puede relacionarse con la proximidad al cauce del río Chili, la presencia de materiales aluviales y la acumulación natural de humedad en la parte inferior del talud. Sin embargo, debe precisarse que estos resultados no implican la medición directa de nivel freático ni de presión de poros, debido a que no se instalaron piezómetros ni instrumentos hidrogeológicos durante la investigación.

La comparación entre zonas permite observar una tendencia general de

incremento del contenido de humedad desde la cresta hacia el pie del talud. Esta tendencia es coherente con la ubicación geomorfológica de las muestras y con las condiciones observadas durante la exploración de campo, donde el pie del talud presentó mayor presencia de material aluvial, cantos y bloques próximos al río Chili.

Desde el punto de vista geotécnico, el contenido de humedad permitió complementar la interpretación de las propiedades físicas del suelo, especialmente en relación con la granulometría, plasticidad y clasificación SUCS. Aunque este parámetro no fue utilizado directamente como dato de entrada principal en el modelamiento de estabilidad en Slide V6.004, sí contribuyó a comprender la variabilidad geotécnica de los materiales evaluados.

En conjunto con los resultados de densidad máxima y mínima, límite líquido, clasificación SUCS, propiedades de plasticidad, gravedad específica y corte directo, el contenido de humedad permitió fortalecer la caracterización geotécnica de las zonas de cresta, zona media y pie del talud, sirviendo como información complementaria para el análisis estático, pseudoestático, de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria.

4.1.8. *Clasificación método SUCS*

Permitió caracterizar los materiales presentes en el área de estudio a partir de su composición granulométrica, contenido de finos, plasticidad y parámetros derivados de gradación. Esta clasificación fue necesaria para identificar el tipo de suelo predominante en las muestras evaluadas y relacionarlo con el comportamiento geotécnico de las zonas de cresta, zona media y pie del talud.

Para el desarrollo de la clasificación SUCS se consideraron los resultados del análisis granulométrico, el porcentaje que pasa el tamiz N.° 200, los límites de Atterberg, el índice de plasticidad, los parámetros de gradación y la proporción relativa de grava, arena y finos. Estos criterios permitieron diferenciar los suelos gruesos, identificar el predominio de arena y definir la presencia de finos limosos en las muestras analizadas.

Los resultados obtenidos evidencian que las muestras evaluadas corresponden principalmente a suelos gruesos con predominio de arena, presentando variaciones en el contenido de grava, arena y finos. Esta condición resulta relevante para la investigación, debido a que permite sustentar la variabilidad geotécnica de los materiales superficiales

utilizados posteriormente en el análisis de estabilidad bidimensional.

Distribución granulométrica y composición del suelo

La distribución granulométrica permitió determinar la proporción de grava, arena y finos presente en cada una de las muestras evaluadas. Esta información constituye la base inicial para la clasificación SUCS, debido a que permite identificar si el material corresponde a un suelo grueso o fino, así como reconocer el predominio de arena o grava dentro de la fracción gruesa.

Tabla 15

Distribución granulométrica y composición del suelo

ID Muestra	% Pasa #4	% Pasa #200	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	% Finos (#200)	% Grava (>#4)	% Arena (#4-#200)
H - 01	98.25	18.10	No aplica	0.10	1.05	18.10	1.75	80.15
H - 05	70.44	11.18	0.08	0.26	2.12	11.18	29.56	59.25
H - 07	86.36	6.24	0.10	0.31	1.02	6.24	13.64	80.12
H - 11	98.58	21.38	No aplica	0.09	0.23	21.38	1.42	77.19
H - 13	81.30	7.65	0.08	0.21	1.01	7.65	18.70	73.66
H - 18	88.11	7.23	0.09	0.24	0.81	7.23	11.89	80.88
H - 19	83.10	5.91	0.10	0.25	0.88	5.91	16.90	77.19
H - 22	94.11	13.93	No aplica	0.12	0.33	13.93	5.89	80.18
H - 24	91.16	11.29	No aplica	0.17	0.55	11.29	8.84	79.87

Nota. La tabla presenta los resultados del análisis granulométrico de las muestras representativas del área de estudio, indicando el porcentaje de grava, arena y finos, así como los diámetros característicos empleados para la clasificación geotécnica conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Del análisis de la Tabla 15 se observa que todas las muestras evaluadas corresponden a suelos gruesos, debido a que el porcentaje de finos no supera el 50 %. Asimismo, se evidencia un predominio de la fracción arenosa, con valores de arena que varían aproximadamente entre 59.25 % y 80.88 %. El menor valor de arena corresponde a la muestra H-05, mientras que el mayor valor corresponde a la muestra H-18.

El contenido de grava presenta valores variables entre 1.42 % y 29.56 %. El menor porcentaje de grava se registró en la muestra H-11, mientras que el mayor porcentaje se obtuvo en la muestra H-05. Esta variación evidencia diferencias en la composición física de los materiales evaluados, especialmente entre muestras con mayor presencia de partículas gruesas y aquellas con predominio de arena y finos.

Respecto al contenido de finos, los valores varían aproximadamente entre 5.91 % y 21.38 %. El menor contenido de finos corresponde a la muestra H-19, mientras que el

mayor contenido corresponde a la muestra H-11. Las muestras H-01, H-11 y H-22 presentan contenidos de finos superiores al 12 %, mientras que las muestras H-05, H-07, H-13, H-18, H-19 y H-24 presentan contenidos de finos entre aproximadamente 5 % y 12 %.

En términos geotécnicos, estos resultados muestran que los materiales no son completamente homogéneos, sino que presentan variaciones en la proporción de arena, grava y finos. Esta condición respalda la existencia de variabilidad geotécnica entre las muestras evaluadas y justifica la necesidad de analizar los parámetros del suelo de manera diferenciada según las zonas representativas del talud.

Propiedades de plasticidad y finos

Las propiedades de plasticidad fueron evaluadas a partir de los límites de Atterberg y del índice de plasticidad, con la finalidad de identificar el comportamiento de la fracción fina presente en las muestras. Esta información permitió definir si los finos corresponden a materiales limosos o arcillosos dentro del criterio de clasificación SUCS.

Tabla 16

Propiedades de plasticidad y finos

ID Muestra	LL (%)	LP (o 'NP')	IP (num)	IP (reporte)	Tipo finos (M/C)
H - 01	31.09	NP	0.00	NP	M
H - 05	23.39	NP	0.00	NP	M
H - 07	34.20	NP	0.00	NP	M
H - 11	36.90	NP	0.00	NP	M
H - 13	26.26	NP	0.00	NP	M
H - 18	26.70	NP	0.00	NP	M
H - 19	25.67	NP	0.00	NP	M
H - 22	28.60	NP	0.00	NP	M
H - 24	24.72	NP	0.00	NP	M

Nota. La tabla presenta los resultados de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad y contenido de finos considerados para la clasificación SUCS de las muestras evaluadas.

Del análisis de la Tabla 16 se observa que las muestras presentan valores de límite líquido dentro de rangos bajos a moderados, con valores aproximados entre 23.39 % y 36.90 %. Asimismo, los resultados indican que el límite plástico fue reportado como NP y que el índice de plasticidad corresponde a 0 o NP, lo cual evidencia que los finos presentes en las muestras no presentan comportamiento plástico apreciable.

Esta condición permite interpretar que la fracción fina de los suelos evaluados corresponde principalmente a finos de tipo limoso, identificados en la clasificación SUCS con la letra M. Por ello, las muestras con contenido de finos superior al 12 % fueron clasificadas como SM, es decir, arenas limosas, mientras que las muestras con finos entre 5 % y 12 % fueron clasificadas como SP-SM, es decir, arenas mal gradadas con limo.

Las muestras H-01, H-11 y H-22 presentan contenidos de finos mayores al 12 %, por lo que se clasifican como SM: arena limosa. En cambio, las muestras H-05, H-07, H-13, H-18, H-19 y H-24 presentan contenidos de finos entre 5 % y 12 %, por lo que se clasifican como SP-SM: arena mal gradada con limo.

Desde el punto de vista geotécnico, la baja plasticidad de los finos resulta importante porque indica que el comportamiento de los materiales evaluados está gobernado principalmente por su composición granular y por la presencia variable de arena, grava y limo. Esta información complementa la interpretación de la variabilidad geotécnica y permite sustentar la selección de parámetros para el análisis de estabilidad.

Parámetros derivados y clasificación ingenieril

Los parámetros derivados de gradación, como el coeficiente de uniformidad Cu y el coeficiente de curvatura Cc, permitieron complementar la clasificación ingenieril de los suelos evaluados. Estos parámetros fueron utilizados principalmente en las muestras donde la granulometría permitió obtener valores representativos de D10, D30 y D60.

Tabla 17

Clasificación geotécnica de las muestras mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

ID de muestra	¿Fino/ Grueso?	Tipo (S/G)	Rango finos	Cu	Cc	Gradación (W/P)	SUCS	Descripción
H - 01	GRUESO	S	>12%				SM	Arena limosa
H - 05	GRUESO	S	5–12%	28.32	0.42	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo
H - 07	GRUESO	S	5–12%	10.19	0.92	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo
H - 11	GRUESO	S	>12%				SM	Arena limosa
H - 13	GRUESO	S	5–12%	11.92	0.51	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo
H - 18	GRUESO	S	5–12%	9.03	0.81	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo
H - 19	GRUESO	S	5–12%	9.07	0.75	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo

H - 22	GRUESO	S	>12%		SM	Arena limosa
H – 24	GRUESO	S	5–12%	P	SP-SM	Arena mal gradada con limo

Nota. La tabla presenta los parámetros derivados de gradación y la clasificación ingenieril de las muestras evaluadas conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Del análisis de la Tabla 17 se observa que las muestras evaluadas presentan clasificación SUCS principalmente de tipo SM y SP-SM. Las muestras H-01, H-11 y H-22 fueron clasificadas como SM: arena limosa, debido a que presentan contenidos de finos superiores al 12 % y finos no plásticos de comportamiento limoso.

Por otro lado, las muestras H-05, H-07, H-13, H-18, H-19 y H-24 fueron clasificadas como SP-SM: arena mal gradada con limo, debido a que presentan predominio de arena, contenidos de finos entre 5 % y 12 %, y comportamiento no plástico de la fracción fina.

En las muestras donde fue posible determinar parámetros de gradación, se obtuvieron valores de Cu y Cc que permiten complementar la interpretación del acomodo granulométrico. Por ejemplo, se registraron valores de Cu aproximados entre 9.03 y 28.32, mientras que los valores de Cc se ubicaron aproximadamente entre 0.42 y 0.92. Estos resultados permiten reconocer diferencias en la distribución de tamaños de partículas entre las muestras analizadas.

La clasificación ingenieril final evidencia que el área de estudio está conformada principalmente por arenas limosas y arenas mal gradadas con limo, materiales característicos de depósitos superficiales con presencia variable de fracción granular y finos limosos. Esta condición es coherente con la ubicación del talud en la margen del río Chili y con la presencia de materiales aluviales observados durante la exploración de campo.

En conjunto, la clasificación SUCS permitió establecer una base geotécnica para interpretar el comportamiento de los materiales evaluados. Asimismo, estos resultados sirvieron como complemento para la selección de parámetros físicos y resistentes empleados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004, especialmente en relación con el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción interna.

4.1.9. *Gravedad específica*

Constituye una propiedad índice importante dentro de la caracterización geotécnica, debido a que permite interpretar la naturaleza mineralógica relativa de las partículas y complementar el análisis físico de los materiales evaluados. Este parámetro también contribuye a la interpretación de propiedades asociadas como densidad, relación de vacíos y peso unitario.

El ensayo de gravedad específica se realizó conforme a la norma ASTM D854, empleando el método del picnómetro sobre muestras representativas obtenidas durante la campaña de exploración geotécnica. Los resultados fueron corregidos a una temperatura de referencia de 20 °C, con la finalidad de obtener valores comparables entre las muestras evaluadas.

Tabla 18

Gravedad específica y clasificación SUCS

Muestra	Gs a 20 °C	Clasificación SUCS	SUCS (símbolo)
H-01	2.330	Arena limosa	SM
H-05	2.648	Arena mal gradada con limo	SP–SM
H-07	2.459	Arena mal gradada con limo	SP–SM
H-11	2.577	Arena limosa	SM
H-13	2.685	Arena mal gradada con limo	SP–SM
H-18	2.665	Arena mal gradada con limo	SP–SM
H-19	2.713	Arena mal gradada con limo	SP–SM
H-22	2.477	Arena limosa	SM
H-24	2.950	Arena mal gradada con limo	SP–SM

Nota. Los valores de gravedad específica (Gs) fueron determinados mediante el método del picnómetro conforme a la norma ASTM D854 y corregidos a una temperatura de referencia de 20 °C. La clasificación SUCS corresponde a la caracterización granulométrica y de plasticidad presentada previamente.

Del análisis de la Tabla 18 se observa que la gravedad específica presenta valores comprendidos entre 2.330 y 2.950. El valor mínimo corresponde a la muestra H-01, clasificada como SM (arena limosa), mientras que el valor máximo corresponde a la muestra H-24, clasificada como SP-SM (arena mal gradada con limo). Los resultados evidencian diferencias entre las muestras evaluadas y complementan la caracterización física de los materiales presentes en el área de estudio.

La gravedad específica se empleó como propiedad índice complementaria de la caracterización geotécnica. Su interpretación se limita a los valores obtenidos

experimentalmente mediante ASTM D854, sin atribuir las diferencias observadas a una composición mineralógica específica, debido a que la investigación no incluyó ensayos mineralógicos.

4.1.10. *Permeabilidad del suelo*

Se realizó con la finalidad de estimar la capacidad de flujo del agua a través de los materiales evaluados. Este parámetro permite complementar la caracterización física de los suelos, especialmente considerando que el área de estudio se ubica en la margen del río Chili y presenta materiales granulares con presencia variable de finos.

Para este ensayo se seleccionaron tres muestras representativas, correspondientes a las zonas principales del talud: C-01 a 0.50 m para la cresta, C-05 a 0.50 m para la zona media y C-08 a 1.00 m para el pie del talud. La selección respondió a un criterio técnico intencional, considerando la representatividad de cada zona, la disponibilidad de material adecuado y la correspondencia con las muestras utilizadas para la caracterización geotécnica del talud.

Tabla 19

Resultados del ensayo de permeabilidad

Muestra	Zona representada	Profundidad	k promedio corregido a 20 °C
C-01	Cresta	0.50 m	1.00×10^{-3} cm/s
C-05	Zona media	0.50 m	3.35×10^{-4} cm/s
C-08	Pie del talud	1.00 m	1.39×10^{-3} cm/s

Nota. Los valores corresponden al promedio de los ensayos realizados para cada muestra representativa.

Del análisis de la Tabla 19 se observa que la muestra C-01 a 0.50 m, correspondiente a la cresta, presenta un coeficiente de permeabilidad promedio aproximado de 1.00×10^{-3} cm/s. Este valor evidencia una capacidad de flujo moderada dentro del material evaluado, coherente con la presencia predominante de suelos arenosos con finos limosos.

La muestra C-05 a 0.50 m, correspondiente a la zona media, presenta el menor coeficiente de permeabilidad promedio, con un valor aproximado de 3.35×10^{-4} cm/s. Esta reducción puede asociarse a una mayor presencia relativa de finos, menor continuidad de vacíos o diferencias en el acomodo de partículas respecto a las otras zonas

evaluadas.

Por su parte, la muestra C-08 a 1.00 m, correspondiente al pie del talud, presenta el mayor coeficiente de permeabilidad promedio, con un valor aproximado de 1.39×10^{-3} cm/s. Este resultado puede relacionarse con la presencia de materiales aluviales, cantos, bloques y fracciones granulares observadas durante la excavación en la zona próxima al río Chili.

En conjunto, los resultados de permeabilidad muestran diferencias entre las tres zonas evaluadas. El menor valor se presenta en la zona media, mientras que el mayor valor corresponde al pie del talud. Esta variación es coherente con la heterogeneidad de los materiales observados en campo y con la clasificación SUCS obtenida previamente, donde predominan arenas limosas y arenas mal gradadas con limo.

Debe precisarse que la permeabilidad fue considerada como un ensayo complementario de caracterización física del suelo. Sus resultados no fueron utilizados directamente como parámetro de entrada en el modelamiento de estabilidad en Slide V6.004, debido a que la investigación no incluyó mediciones directas de nivel freático, presión de poros ni instrumentación piezométrica. Sin embargo, el ensayo permite reforzar la interpretación de las condiciones físicas del material y su posible relación con la humedad natural observada en las zonas evaluadas.

Por tanto, la permeabilidad complementa la caracterización geotécnica del área de estudio, pero no modifica el enfoque principal del análisis, el cual se centra en la influencia de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal sobre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos.

4.1.11. *Ensayo de corte directo y parámetros geotécnicos empleados en Slide*

El ensayo de corte directo se realizó con la finalidad de determinar los parámetros resistentes del suelo empleados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad mediante Slide V6.004. A partir de este ensayo se obtuvieron la cohesión efectiva (c′) y el ángulo de fricción interna efectiva (φ′), parámetros necesarios para aplicar el criterio de resistencia Mohr-Coulomb en los modelos de estabilidad.

Para el ensayo se utilizaron las muestras C-01 a 0.50 m, C-05 a 0.50 m y C-08 a 1.00 m, correspondientes a la cresta, zona media y pie del talud, respectivamente. Estas muestras fueron seleccionadas mediante el criterio técnico intencional y progresivo

descrito en la metodología. Para cada una se efectuaron tres corridas bajo diferentes esfuerzos normales, obteniéndose finalmente una envolvente de Mohr-Coulomb y un par de parámetros c′-φ′ representativo de cada zona.

En total se realizaron nueve corridas instrumentales; sin embargo, estas corresponden a tres determinaciones de resistencia al corte, una por cada muestra seleccionada. Por ello, los parámetros obtenidos se interpretan como representativos de las tres secciones analizadas y no como una caracterización estadística general de la resistencia mecánica de todos los taludes del barrio La Recoleta.

Los valores obtenidos mediante el ensayo de corte directo fueron integrados con el peso unitario correspondiente a cada zona para definir los parámetros geotécnicos de entrada utilizados en los modelos desarrollados en Slide V6.004.

Tabla 20

Parámetros geotécnicos representativos empleados en el modelamiento en Slide V6.004

Zona del talud	Muestra representativa	Profundidad	Peso unitario γ (kN/m³)	Cohesión c' (kPa)	Ángulo de fricción φ' (°)
Cresta	C-01	0.50 m	12.78	14.64	28.00
Zona media	C-05	0.50 m	15.57	0.85	33.00
Pie del talud	C-08	1.00 m	20.06	13.87	31.00

Nota. Los valores experimentales de ángulo de fricción interna obtenidos mediante el ensayo de corte directo fueron φ = 27.94° para la cresta, φ = 33.36° para la zona media y φ = 30.73° para el pie del talud. Para su incorporación en los modelos de Slide V6.004 se adoptaron valores redondeados a la unidad de 28.00°, 33.00° y 31.00°, respectivamente. Los valores de cohesión y peso unitario se mantuvieron conforme a los parámetros representativos determinados para cada sección.

Del análisis de los parámetros geotécnicos se observa que la zona media presenta la menor cohesión, con c = 0.85 kPa, a pesar de registrar el mayor ángulo de fricción interna, con φ = 33.36°. La muestra C-05 presentó la menor cohesión, con c′ = 0.85 kPa, y el mayor ángulo de fricción interna, con φ′ ≈ 33.36°. Para la condición ensayada, este comportamiento evidencia una mayor contribución relativa del componente friccional a la resistencia al corte. No obstante, al corresponder a una única muestra mecánica representativa de la zona media, este resultado debe interpretarse dentro del alcance del

ensayo realizado. En cambio, la cresta y el pie del talud presentan valores de cohesión mayores, con 14.64 kPa y 13.87 kPa, respectivamente.

Asimismo, el peso unitario presenta un incremento desde la cresta hacia el pie del talud, pasando de 12.78 kN/m³ en la cresta a 20.06 kN/m³ en el pie. Esta variación es coherente con la presencia de materiales más densos y de origen aluvial en la parte inferior del talud, donde durante la exploración de campo se identificaron cantos, bloques y material granular próximo al río Chili.

En conjunto, los valores de peso unitario, cohesión y ángulo de fricción interna constituyen los parámetros geotécnicos principales empleados en el modelamiento bidimensional de estabilidad en Slide V6.004. Por ello, la siguiente etapa del análisis corresponde a la evaluación de la estabilidad estática de las secciones representativas del talud.

4.2. Análisis bidimensional estático de estabilidad

Se desarrolló con la finalidad de evaluar el comportamiento del talud bajo condiciones sin acción sísmica. Para ello, se emplearon los parámetros geotécnicos representativos obtenidos a partir de los ensayos de laboratorio, principalmente el peso unitario, la cohesión y el ángulo de fricción interna, asignados a las secciones de cresta, zona media y pie del talud.

El modelamiento estático fue realizado en Slide V6.004, aplicando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y el método de equilibrio límite de Spencer. Todos los factores de seguridad estáticos reportados para la cresta, zona media y pie del talud fueron calculados mediante este método. Asimismo, se identificó en cada sección la superficie crítica de falla correspondiente al menor FS obtenido.

En los tres modelos estáticos se mantuvo la configuración Water Surface = None, por lo que no se incorporó una superficie freática activa ni presión de poros. Esta condición corresponde al escenario de modelamiento adoptado ante la ausencia de mediciones piezométricas directas y no implica que el terreno se encuentre necesariamente seco en condiciones reales.

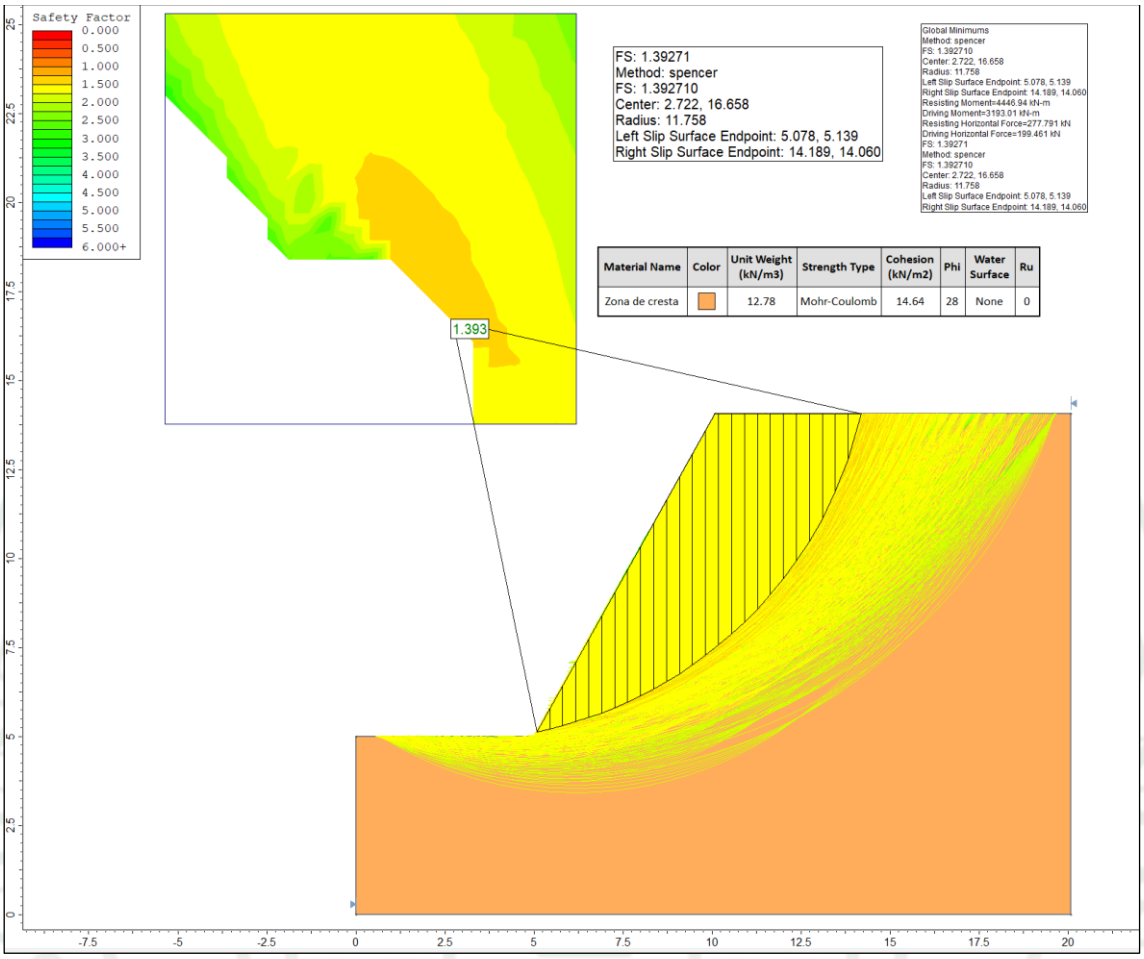
En esta etapa no se consideró acción sísmica, por lo que los resultados obtenidos representan la condición base de estabilidad del talud. Estos valores permitieron comparar el comportamiento de las tres zonas evaluadas y establecer el punto de referencia para el análisis pseudoestático desarrollado posteriormente.

4.2.1. *Estabilidad estática en la zona de cresta*

La evaluación bidimensional estática correspondiente a la zona de cresta se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 12.78 kN/m³, una cohesión de 14.64 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 28.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental φ = 27.94° obtenido mediante el ensayo de corte directo.

Figura 14

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en la zona de cresta



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

El análisis estático de la zona de cresta obtuvo un factor de seguridad FS = 1.393. Este valor es superior a la condición de equilibrio límite FS = 1.00, por lo que la resistencia calculada en el modelo supera a las acciones movilizantes; sin embargo, es inferior al factor de seguridad mínimo FS = 1.50 establecido por la Norma Técnica CE.020 para solicitaciones estáticas. En consecuencia, la cresta presenta el mayor FS relativo entre las tres secciones estudiadas, pero no alcanza el valor mínimo normativo utilizado como criterio de comparación.

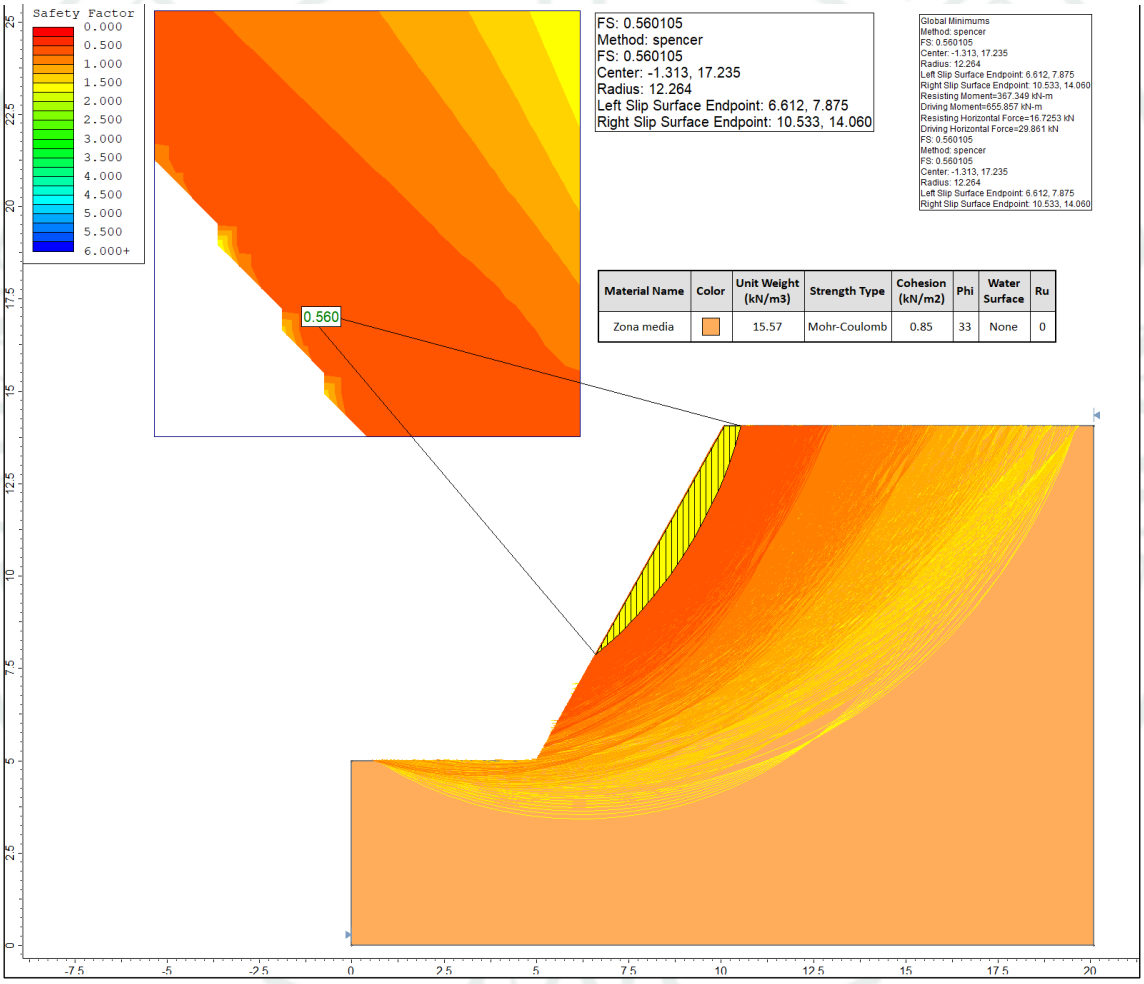
El margen de seguridad respecto del equilibrio límite es MS = 0.393. Este valor permite reconocer una separación positiva respecto de FS = 1.00, pero no debe confundirse con cumplimiento normativo. La interpretación de esta sección se realiza conjuntamente con los resultados de las demás zonas y con el análisis de sensibilidad desarrollado posteriormente.

4.2.2. *Estabilidad estática en la zona media*

La evaluación bidimensional estática correspondiente a la zona media del talud se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 15.57 kN/m³, una cohesión de 0.85 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 33.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental φ = 33.36° obtenido mediante el ensayo de corte directo.

Figura 15

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en la zona media



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

La zona media presentó un factor de seguridad estático FS = 0.560, valor inferior a la unidad y al mínimo normativo de FS = 1.50. Al encontrarse por debajo del equilibrio límite, el modelo representa una condición de insuficiencia de estabilidad, siendo esta sección la más crítica entre las tres evaluadas bajo condición estática.

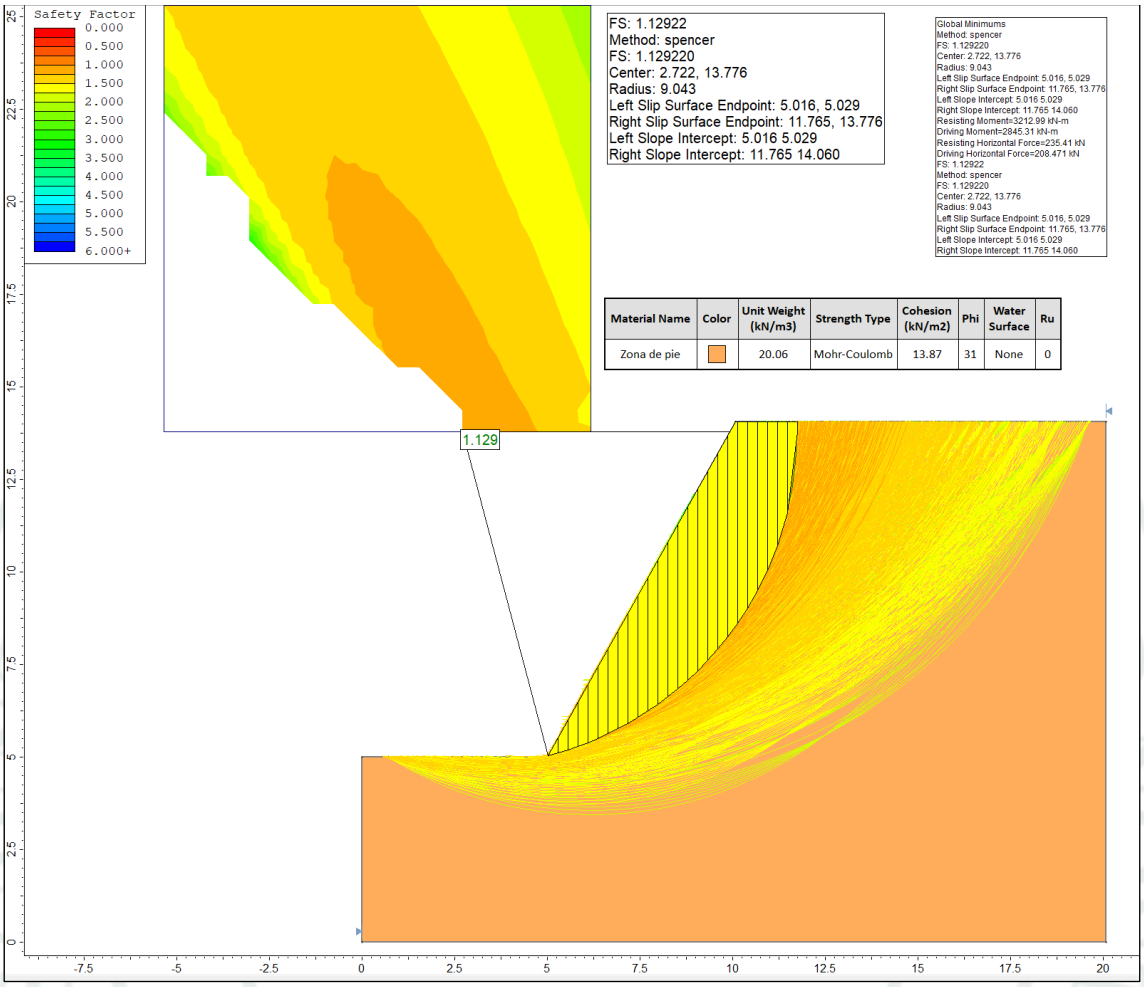
La zona media presenta una cohesión representativa menor que las otras secciones; no obstante, la comparación directa entre cresta, zona media y pie involucra simultáneamente parámetros geotécnicos diferenciados, bajo una geometría bidimensional común de referencia. Por ello, este resultado no se atribuye de manera exclusiva a la cohesión. La influencia individual de cada parámetro se determina posteriormente mediante el análisis de sensibilidad, manteniendo constante la geometría y variando un parámetro por vez.

4.2.3. *Estabilidad estática en el pie del talud*

La evaluación bidimensional estática correspondiente al pie del talud se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 20.06 kN/m³, una cohesión de 13.87 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 31.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental $\varphi = 30.73°$ obtenido mediante el ensayo de corte directo.

Figura 16

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis estático en el pie del talud



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

El pie del talud obtuvo un factor de seguridad estático FS = 1.129. Aunque este valor es superior al equilibrio límite FS = 1.00 y presenta un margen MS = 0.129, se encuentra por debajo del factor de seguridad mínimo FS = 1.50 establecido por la Norma Técnica CE.020 para solicitaciones estáticas. En consecuencia, el pie del talud se encuentra por debajo del umbral normativo de referencia y presenta una holgura reducida respecto del equilibrio límite.

El resultado debe interpretarse como una condición menos favorable que la cresta y más favorable que la zona media dentro de la comparación relativa de las tres secciones. Las diferencias entre los factores de seguridad responden al efecto conjunto de los parámetros geotécnicos diferenciados asignados a cada sección, bajo una geometría bidimensional común de referencia, por lo que la contribución individual de cada parámetro se evalúa mediante sensibilidad.

4.2.4. *Comparación de factores de seguridad en condición estática*

Con la finalidad de comparar el comportamiento de las tres secciones representativas del talud, se sistematizaron los factores de seguridad obtenidos mediante el análisis bidimensional estático en Slide V6.004, empleando el método de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para evitar una clasificación basada únicamente en FS>1.00, los resultados fueron contrastados con el criterio normativo definido previamente. La Norma Técnica CE.020 establece un factor de seguridad mínimo FS = 1.50 para solicitaciones estáticas.

Tabla 21

Comparación de factores de seguridad en condición estática

Zona evaluada	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	FS estático	MS = FS - 1.00	Contraste con FS mínimo CE.020
Cresta	12.78	14.64	28.00	1.393	0.393	FS<1.50 de referencia
Zona media	15.57	0.85	33.00	0.560	-0.440	FS<1.00 y<1.50 de referencia
Pie del talud	20.06	13.87	31.00	1.129	0.129	FS<1.50 de referencia

Nota. Los factores de seguridad fueron obtenidos mediante Slide V6.004, aplicando el método de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para la interpretación se adopta como referencia la Norma Técnica CE.020, que establece FS mínimo = 1.50 para solicitaciones estáticas. El margen MS = FS - 1.00 expresa únicamente la distancia respecto del equilibrio límite FS = 1.00 y no sustituye el criterio normativo.

La cresta presenta el mayor FS estático, FS = 1.393. Aunque supera la unidad y su margen respecto del equilibrio límite es positivo, el valor es menor que FS = 1.50; por tanto, se encuentra por debajo del FS mínimo normativo empleado como referencia.

La zona media presenta FS = 0.560 y MS = -0.440. Al ser FS<1.00, la resistencia calculada no alcanza la requerida para el equilibrio límite, por lo que constituye la sección más crítica en el escenario estático. Además, el valor se encuentra ampliamente por debajo del valor mínimo de referencia de 1.50.

El pie del talud presenta FS = 1.129 y MS = 0.129. El resultado supera ligeramente el equilibrio límite, pero no alcanza FS = 1.50. Por ello, no corresponde clasificarlo como estable por el solo hecho de ser mayor que la unidad; se interpreta como una sección con

margen positivo respecto del equilibrio límite, pero insuficiente frente al umbral normativo adoptado como referencia.

En conjunto, los factores de seguridad muestran diferencias entre las tres secciones. Debido a que se empleó una geometría bidimensional común de referencia, estas diferencias se asocian principalmente a los parámetros geotécnicos diferenciados asignados a cada sección. Por ello, la comparación entre zonas permite establecer su comportamiento relativo, pero no demuestra por sí sola la influencia individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna o el peso unitario. Dicha influencia se cuantifica posteriormente mediante el análisis de sensibilidad paramétrica.

4.3. Análisis bidimensional pseudoestático de estabilidad

Se desarrolló con la finalidad de evaluar el comportamiento del talud considerando una acción sísmica horizontal simplificada. Para ello, se emplearon los mismos parámetros geotécnicos utilizados en el análisis estático: peso unitario, cohesión y ángulo de fricción interna, asignados a las secciones de cresta, zona media y pie del talud.

El modelamiento pseudoestático fue realizado en Slide V6.004, aplicando el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y el método de equilibrio límite de Spencer. Todos los factores de seguridad pseudoestáticos reportados para la cresta, zona media y pie del talud fueron calculados mediante este método. Para el escenario determinístico se empleó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente sísmico vertical kv = 0.00, con la finalidad de representar de manera simplificada la acción sísmica horizontal.

La condición hidráulica se mantuvo igual que en los modelos estáticos, utilizando Water Surface = None y sin incorporar presión de poros, con la finalidad de que la comparación entre ambos escenarios se efectuara bajo las mismas condiciones hidráulicas de modelamiento.

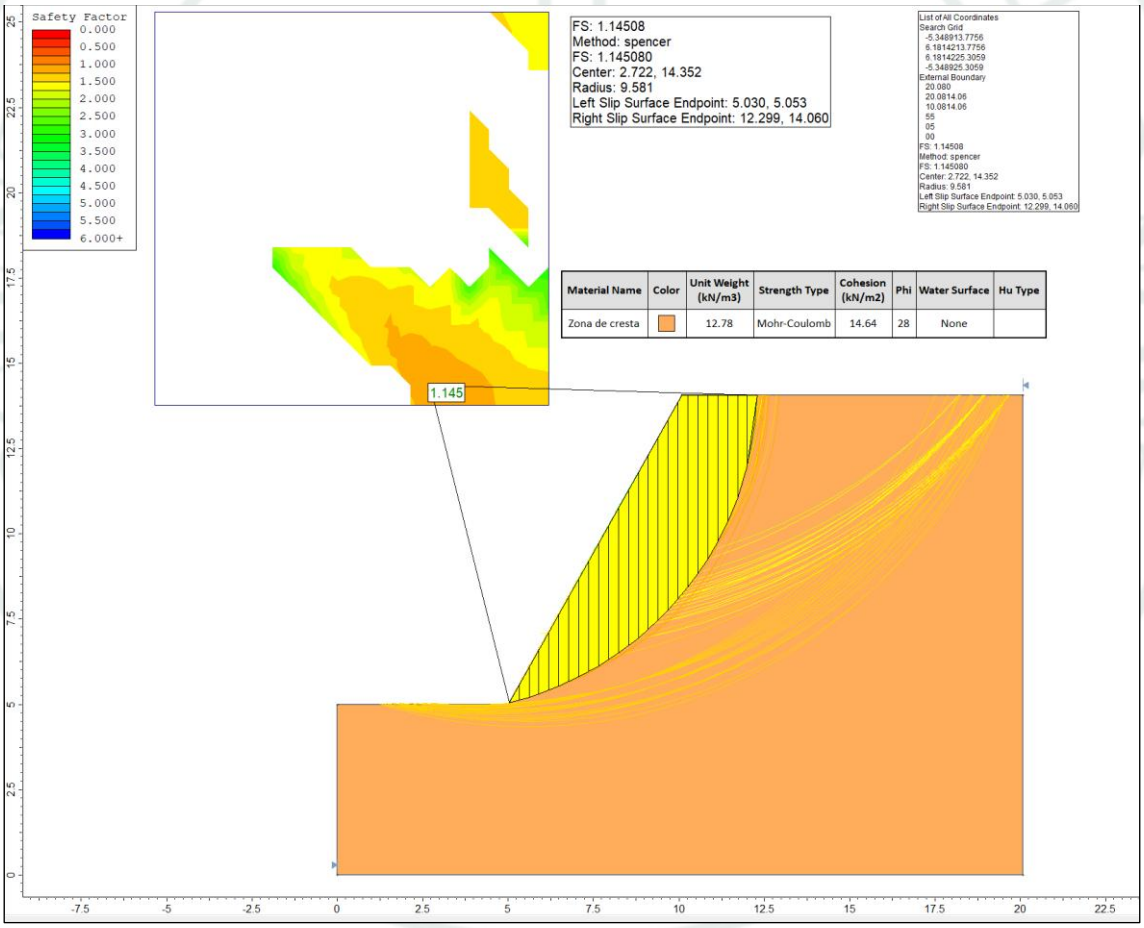
La incorporación del coeficiente sísmico horizontal permitió evaluar la reducción del FS respecto a la condición estática. De esta manera, los resultados pseudoestáticos permiten comparar la respuesta de las secciones y reconocer aquellas con menores factores de seguridad frente a la solicitación sísmica simplificada evaluada.

4.3.1. *Estabilidad pseudoestática en la zona de cresta*

La evaluación bidimensional pseudoestática correspondiente a la zona de cresta se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 12.78 kN/m³, una cohesión de 14.64 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 28.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental φ = 27.94°. Asimismo, se incorporó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00.

Figura 17

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en la zona de cresta



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

En condición pseudoestática, la zona de cresta obtuvo FS = 1.145 empleando kh = 0.175 y kv = 0.00. El valor es superior al equilibrio límite FS = 1.00, pero inferior al factor de seguridad mínimo FS = 1.25 establecido por la Norma Técnica CE.020 para solicitaciones sísmicas. Por tanto, la sección conserva resistencia superior a la requerida

para el equilibrio límite, pero no alcanza el criterio normativo de referencia.

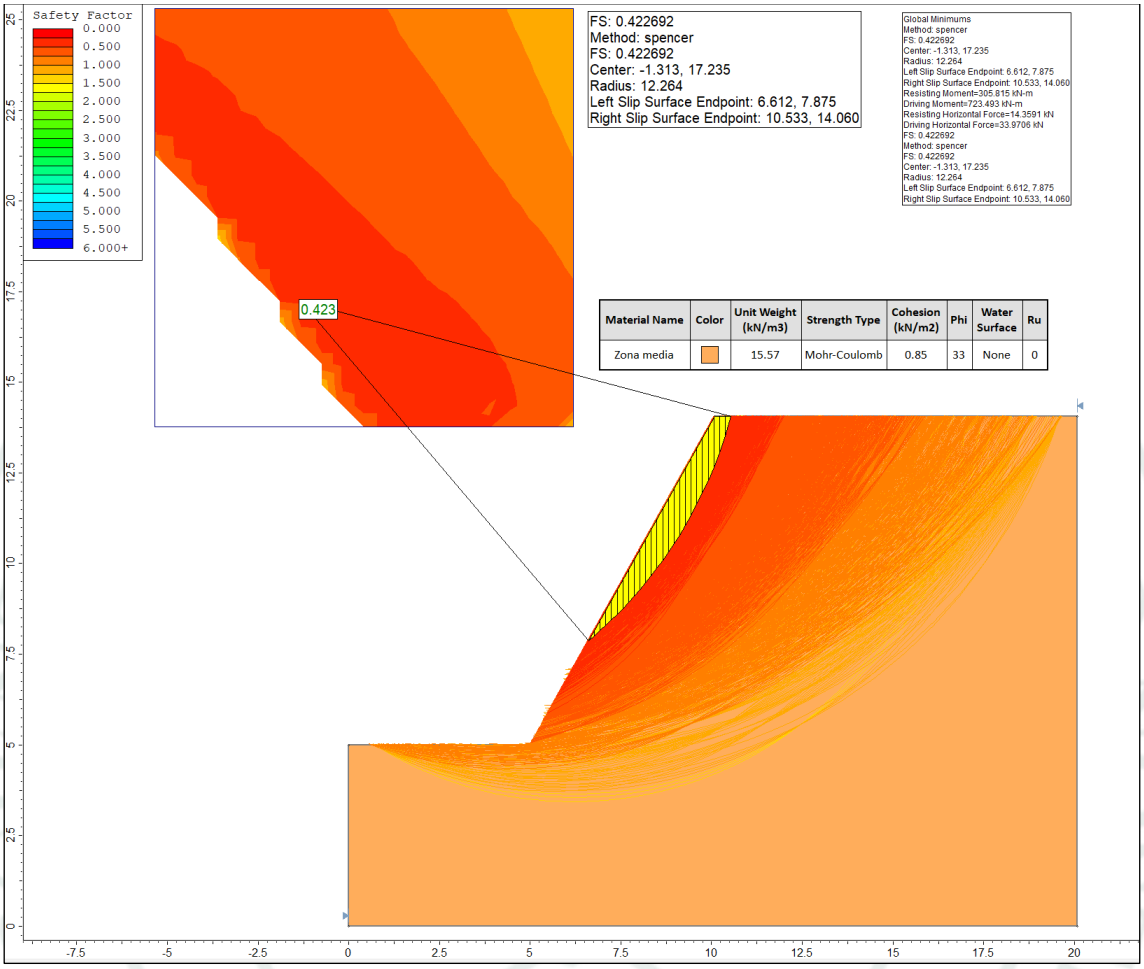
Respecto del análisis estático, el FS disminuye de 1.393 a 1.145. Esta comparación se realiza sobre la misma sección y con los mismos parámetros geotécnicos base, modificándose la condición de carga mediante la incorporación de kh. La cuantificación de la respuesta del FS frente a distintos valores de kh se desarrolla posteriormente en el análisis de sensibilidad.

4.3.2. *Estabilidad pseudoestática en la zona media*

La evaluación bidimensional pseudoestática correspondiente a la zona media del talud se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 15.57 kN/m³, una cohesión de 0.85 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 33.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental $\varphi = 33.36°$. Asimismo, se incorporó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00.

Figura 18

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en la zona media



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

La zona media presentó un FS pseudoestático FS = 0.423, valor inferior a FS = 1.00 y al mínimo normativo FS = 1.25. El resultado representa una condición de insuficiencia de estabilidad dentro del modelo y mantiene a la zona media como la sección más crítica bajo el escenario pseudoestático evaluado.

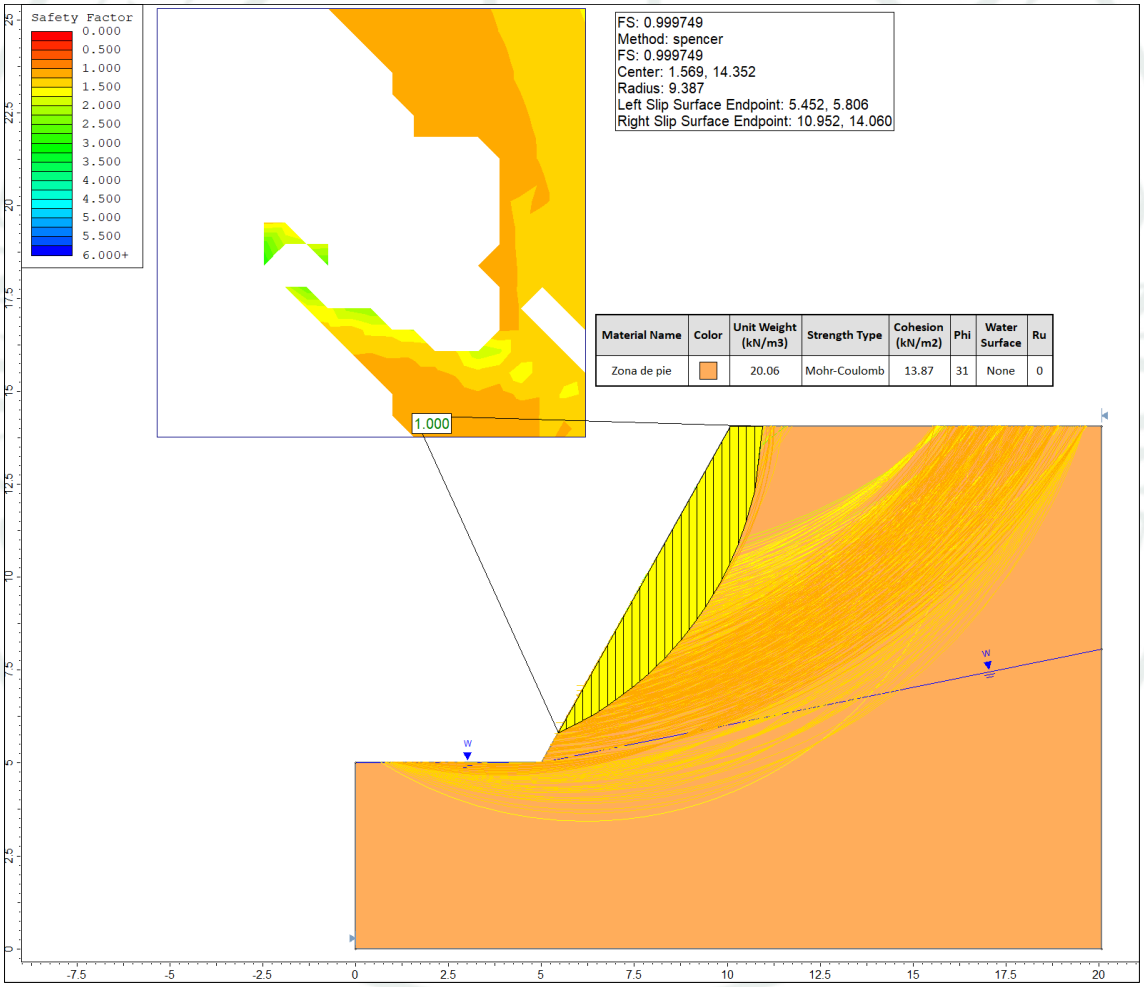
Aunque la sección presenta una cohesión representativa reducida, el resultado no se atribuye exclusivamente a este parámetro, debido a que la respuesta del modelo también depende de la geometría, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y la acción pseudoestática. La influencia individual de estos parámetros, incluido kh, se evalúa mediante el análisis de sensibilidad.

4.3.3. *Estabilidad pseudoestática en el pie del talud*

La evaluación bidimensional pseudoestática correspondiente al pie del talud se desarrolló mediante el software Slide V6.004, aplicando el método de equilibrio límite de Spencer y el criterio de resistencia Mohr-Coulomb. Para este modelo se emplearon un peso unitario de 20.06 kN/m³, una cohesión de 13.87 kPa y un ángulo de fricción interna adoptado de 31.00°, correspondiente al redondeo del valor experimental φ = 30.73°. Asimismo, se incorporó un coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y un coeficiente vertical kv = 0.00.

Figura 19

Evaluación de estabilidad de un talud mediante un análisis pseudoestático en el pie del talud



Nota. Generado mediante el software Slide V6.004. Elaboración propia.

El pie del talud obtuvo FS = 1.000 bajo el escenario pseudoestático base. Este valor coincide con la condición de equilibrio límite y es inferior al factor de seguridad mínimo FS = 1.25 establecido por la Norma Técnica CE.020 para solicitaciones sísmicas. En consecuencia, el margen respecto del equilibrio límite es MS = 0.000 y la sección no

presenta holgura adicional dentro del modelo.

La disminución desde FS = 1.129 en condición estática hasta FS = 1.000 en condición pseudoestática evidencia el efecto desfavorable de incorporar la acción sísmica horizontal simplificada en esta sección. No obstante, la magnitud de esta respuesta debe interpretarse conjuntamente con el análisis de sensibilidad de kh y con las limitaciones del coeficiente pseudoestático adoptado como valor referencial de modelamiento.

4.3.4. *Comparación de factores de seguridad en condición pseudoestática*

Con la finalidad de comparar el comportamiento de las tres secciones representativas bajo condición pseudoestática, se sistematizaron los factores de seguridad obtenidos en Slide V6.004. En todos los casos se empleó el método de Spencer, el criterio de resistencia Mohr-Coulomb, kh = 0.175 y kv = 0.00. Para la interpretación se adoptó el criterio definido previamente: la Norma Técnica CE.020 establece un factor de seguridad mínimo FS = 1.25 para solicitaciones sísmicas.

Tabla 22

Comparación de factores de seguridad en condición pseudoestática

Zona evaluada	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	FS pseudoest.	MS = FS - 1.00	Contraste con FS mínimo CE.020
Cresta	12.78	14.64	28.00	1.145	0.145	FS<1.25 de referencia
Zona media	15.57	0.85	33.00	0.423	-0.577	FS<1.00 y<1.25 de referencia
Pie del talud	20.06	13.87	31.00	1.000	0.000	Equilibrio límite; FS<1.25 de referencia

Nota. Los factores de seguridad fueron obtenidos mediante Slide V6.004, aplicando Spencer y Mohr-Coulomb, con kh = 0.175 y kv = 0.00. Para la interpretación se adopta como referencia la Norma Técnica CE.020, que establece FS mínimo = 1.25 para solicitaciones sísmicas. FS = 1.00 corresponde al equilibrio límite.

La cresta presenta FS = 1.145 y MS = 0.145. Aunque el resultado supera FS = 1.00, no alcanza el mínimo normativo de 1.25. Por ello, se reconoce que existe un margen positivo respecto del equilibrio límite, pero el valor permanece por debajo del umbral normativo de referencia.

La zona media presenta FS = 0.423 y MS = -0.577. Al encontrarse por debajo de

la unidad, representa una condición de insuficiencia de estabilidad dentro del modelo y continúa siendo la sección más crítica bajo la solicitación pseudoestática.

El pie del talud presenta FS = 1.000 y MS = 0.000, coincidiendo con el equilibrio límite. Asimismo, se encuentra por debajo del FS mínimo de referencia de 1.25. Este resultado evidencia ausencia de holgura adicional en el escenario pseudoestático base.

La comparación entre zonas permite identificar diferencias de respuesta bajo el mismo valor base de kh; sin embargo, la mayor o menor reducción entre secciones no debe interpretarse como demostración aislada de sensibilidad al sismo. Las tres secciones emplean una geometría bidimensional común de referencia, pero presentan parámetros geotécnicos diferenciados. La sensibilidad específica frente a kh se evalúa en el apartado 4.5 mediante la variación de este coeficiente manteniendo constantes las demás condiciones de cada modelo. El valor FS = 1.25 se utiliza como umbral normativo de referencia; no se afirma cumplimiento integral de la CE.020 para el escenario sísmico, debido a que kh = 0.175 fue adoptado como aproximación referencial de modelamiento y no como resultado de un estudio de peligro sísmico específico del sitio.

4.4. Comparación entre condición estática y pseudoestática

Permitió cuantificar la variación del FS producida por la incorporación de la acción sísmica horizontal simplificada en cada una de las tres secciones representativas. En el escenario pseudoestático base se empleó kh = 0.175 y kv = 0.00, manteniendo la geometría bidimensional común de referencia y los parámetros geotécnicos base correspondientes a cada sección. De este modo, la diferencia entre el resultado estático y pseudoestático de una misma sección representa el efecto de incorporar la solicitación pseudoestática considerada.

Tabla 23

Comparación de factores de seguridad entre condición estática y pseudoestática

Zona evaluada	FS estático	FS pseudoest.	Reducción absoluta	Reducción porcentual	MS estático	MS pseudoest.	Evaluación comparativa
Cresta	1.393	1.145	0.248	17.80 %	0.393	0.145	FS bajo el mínimo CE.020 de referencia en ambas condiciones
Zona media	0.560	0.423	0.137	24.46 %	-0.440	-0.577	FS<1.00 en ambas condiciones

Pie del talud	1.129	1.000	0.129	11.43 %	0.129	0.000	FS bajo mínimos de referencia; alcanza equilibrio límite en pseudoestático

Nota. La reducción porcentual fue calculada respecto del FS estático. El margen MS = FS - 1.00 se utiliza como referencia respecto del equilibrio límite. Para el contraste normativo se consideran FS mínimo = 1.50 en estático y FS mínimo = 1.25 en solicitación sísmica, según la Norma Técnica CE.020; estos valores se emplean como umbrales de referencia para interpretar los resultados.

En la cresta, el FS disminuye de 1.393 a 1.145, equivalente a una reducción absoluta de 0.248 y una reducción porcentual de 17.80 %. Ambos valores se encuentran por debajo de los mínimos normativos correspondientes a cada condición, aunque se mantienen por encima del equilibrio límite FS = 1.00.

En la zona media, el FS disminuye de 0.560 a 0.423, con una reducción absoluta de 0.137 y una reducción porcentual de 24.46 %. Ambos resultados se encuentran por debajo de FS = 1.00, por lo que esta sección mantiene la condición más crítica de las tres evaluadas.

En el pie del talud, el FS disminuye de 1.129 a 1.000, correspondiente a una reducción absoluta de 0.129 y una reducción porcentual de 11.43 %. El resultado estático no alcanza el mínimo de 1.50 y el resultado pseudoestático coincide con el equilibrio límite, además de encontrarse por debajo del mínimo sísmico de 1.25.

La mayor reducción porcentual se obtiene en la zona media; sin embargo, esta comparación no demuestra que dicha sección sea exclusivamente la más sensible al efecto sísmico, debido a que las zonas presentan parámetros geotécnicos diferenciados, aun cuando en el modelamiento se empleó una geometría bidimensional común de referencia. Por esta razón, la influencia de kh y de los parámetros c, φ y γ se cuantifica en el análisis de sensibilidad del apartado 4.5, donde se mantiene constante la geometría bidimensional común de referencia y se modifica un parámetro por vez.

En conjunto, los resultados muestran que la incorporación de la acción pseudoestática reduce el FS en las tres secciones. Asimismo, los factores de seguridad obtenidos se encuentran por debajo de los umbrales mínimos de referencia de la Norma Técnica CE.020 en los escenarios correspondientes. Este contraste se utiliza como criterio de interpretación y no modifica los valores obtenidos mediante Slide V6.004. Para la condición pseudoestática, no se afirma cumplimiento integral de la CE.020, debido al carácter referencial de kh = 0.175 y a la ausencia de un estudio de peligro sísmico específico del sitio.

4.5. Análisis de sensibilidad

Se desarrolló con la finalidad de cuantificar la respuesta del FS frente a la variación individual de los principales parámetros de entrada del modelo. A diferencia de la comparación directa entre la cresta, zona media y pie del talud, en este procedimiento se mantuvo constante la geometría bidimensional común de referencia y se modificó una sola variable a la vez, conservando sin cambio los demás parámetros.

El rango de perturbación adoptado para el análisis de sensibilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario se definió como un intervalo simétrico de ±20 % respecto del valor representativo de cada sección, incorporando además niveles intermedios de ±10 % y el escenario base. Esta selección constituye un criterio paramétrico de exploración y no una estimación de la variabilidad espacial real del terreno. El intervalo se adoptó con la finalidad de disponer de un rango suficientemente amplio para observar la respuesta del FS ante modificaciones desfavorables y favorables de cada parámetro, manteniendo al mismo tiempo una secuencia simétrica y comparable entre variables que poseen distintas unidades y magnitudes. Los niveles −20 %, −10 %, base, +10 % y +20 % permiten evaluar ordenadamente la dirección, magnitud y consistencia de la respuesta del modelo mediante un análisis local de sensibilidad, en el cual cada parámetro se modifica individualmente y los demás permanecen constantes.

Este criterio de perturbación paramétrica es consistente con antecedentes recientes de análisis de sensibilidad en estabilidad de taludes. Liu et al. (2026) emplearon variaciones individuales de ±10 % respecto del valor base, manteniendo constantes los demás parámetros, mientras que Hammouti et al. (2026) utilizaron un rango de ±20 % para evaluar la sensibilidad de parámetros en el análisis de estabilidad. Estos antecedentes respaldan el empleo de perturbaciones porcentuales controladas como herramienta exploratoria de sensibilidad, sin que dichos porcentajes representen necesariamente la variabilidad espacial real del terreno.

Debido al número reducido de determinaciones mecánicas independientes disponibles, estos porcentajes no fueron obtenidos a partir de coeficientes de variación, intervalos de confianza, percentiles empíricos ni distribuciones estadísticas ajustadas. Por ello, los resultados derivados de dichas perturbaciones deben interpretarse exclusivamente como respuesta paramétrica del modelo dentro del intervalo adoptado y no como evidencia de que los valores de c, φ y γ presenten necesariamente una variación espacial de ±20 % en el barrio La Recoleta.

Para la cohesión c, el ángulo de fricción interna φ y el peso unitario γ se evaluaron cinco escenarios controlados: -20 %, -10 %, valor base, +10 % y +20 % respecto del valor representativo de cada sección. Estos porcentajes se emplearon como rangos de perturbación para el análisis local de sensibilidad y no como intervalos de confianza, percentiles empíricos o rangos obtenidos a partir de una desviación estándar de tres observaciones.

En los modelos pseudoestáticos se incorporó además la sensibilidad del coeficiente sísmico horizontal kh, considerando los valores 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625 y 0.350. El valor kh = 0.175 corresponde al escenario base adoptado en la investigación. En cada evaluación de kh se mantuvieron constantes la geometría y los parámetros geotécnicos de la sección, de manera que el cambio del FS pudiera asociarse a la modificación de la acción sísmica horizontal simplificada.

Este procedimiento constituye el sustento principal para interpretar la influencia individual de c, φ, γ y kh dentro de los rangos analizados. La simulación Monte Carlo presentada posteriormente se utiliza de forma complementaria para observar la respuesta del FS cuando los parámetros varían simultáneamente.

Tabla 24

Criterios considerados para el análisis de sensibilidad

Variable evaluada	Escenarios considerados	Aplicación	Respuesta evaluada
Cohesión, c	-20 %, -10 %, base, +10 %, +20 %	Estático y pseudoestático	Cambio del FS producido por la variación individual de c.
Ángulo de fricción interna, φ	-20 %, -10 %, base, +10 %, +20 %	Estático y pseudoestático	Cambio del FS producido por la variación individual de φ.
Peso unitario, γ	-20 %, -10 %, base, +10 %, +20 %	Estático y pseudoestático	Cambio del FS producido por la variación individual de γ.
Coeficiente sísmico horizontal, kh	0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625, 0.350	Solo pseudoestático	Cambio del FS producido por la variación individual de kh.

Nota. En cada escenario se modificó una sola variable a la vez, manteniendo constantes la geometría y los demás parámetros del modelo. Los rangos porcentuales de c, φ y γ corresponden a perturbaciones paramétricas controladas y simétricas alrededor del valor base, adoptadas exclusivamente para el análisis local de sensibilidad. No representan intervalos estadísticos ni rangos empíricos de variabilidad espacial derivados de las tres determinaciones mecánicas disponibles.

El análisis de sensibilidad se organizó por secciones representativas del talud. Primero se evaluó la zona de cresta, luego la zona media y finalmente el pie del talud. En

cada caso se interpretó el comportamiento del FS frente a la variación de los parámetros geotécnicos y del coeficiente sísmico horizontal en condición pseudoestática.

4.5.1. *Análisis de sensibilidad en la zona de cresta*

Se desarrolló considerando como escenario base el modelo correspondiente a esta sección, con γ = 12.78 kN/m³, c = 14.64 kPa y φ = 28.00°, valor adoptado en el modelamiento a partir del redondeo de φ = 27.94° obtenido experimentalmente.

En la condición estática se evaluó la variación individual de los parámetros geotécnicos c, φ y γ, manteniendo constante la geometría del modelo y los demás parámetros. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 25

Tabla 25

Análisis de sensibilidad en condición estática – zona de cresta

Variable evaluada	-20 %	-10 %	Base	+10 %	+20 %	Tendencia
Cohesión, c	1.228	1.312	1.393	1.469	1.553	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	1.264	1.320	1.393	1.463	1.532	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	1.591	1.477	1.393	1.315	1.252	A mayor γ, menor FS

Nota. El análisis fue realizado en Slide V6.004, variando un parámetro a la vez y manteniendo constantes los demás valores del modelo.

Del análisis de la Tabla 25 se observa que, bajo condición estática, el FS de la cresta aumenta cuando se incrementan la cohesión y el ángulo de fricción interna. En el caso de la cohesión, el FS varía entre 1.228 y 1.553, mientras que para el ángulo de fricción interna varía entre 1.264 y 1.532.

En cambio, el peso unitario presenta una relación inversa con el FS. Cuando el peso unitario disminuye en 20 %, el FS aumenta hasta 1.591; mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS disminuye hasta 1.252. Esto evidencia que el aumento del peso propio del material incrementa las fuerzas actuantes y reduce la estabilidad de la sección.

Bajo condición estática, la zona de cresta mantiene factores de seguridad superiores a 1.00 en todos los escenarios evaluados. Sin embargo, las variaciones de γ, c y φ modifican el margen de seguridad, mostrando que estos parámetros influyen en la estabilidad de la sección dentro de los escenarios evaluados.

En la condición **pseudoestática** se evaluó nuevamente la variación de c, φ y γ,

incorporando como escenario base el coeficiente sísmico horizontal kh = 0.175 y el coeficiente vertical kv = 0.00. Además, se analizó la sensibilidad del FS frente a diferentes valores de kh.

Tabla 26

Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – zona de cresta

Variable evaluada	-20 % / Bajo	-10 % / Medio bajo	Base	+10 % / Medio alto	+20 % / Alto	Tendencia
Cohesión, c	1.008	1.076	1.145	1.195	1.261	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	1.015	1.074	1.145	1.198	1.262	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	1.280	1.200	1.145	1.083	1.023	A mayor γ, menor FS
Coeficiente sísmico, kh	1.393	1.234	1.145	1.043	1.016	A mayor kh, menor FS

Nota. Para el coeficiente sísmico horizontal se consideraron los valores kh = 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625 y 0.350. El valor base corresponde a kh = 0.175.

Del análisis de la Tabla 26 se observa que la cresta presenta una reducción general del FS al incorporar la condición pseudoestática. El escenario base pseudoestático obtiene FS = 1.145, valor menor al obtenido en condición estática, donde se alcanzó FS = 1.393.

Respecto a la cohesión, el FS varía entre 1.008 y 1.261, lo que evidencia que una reducción de la cohesión aproxima la sección a la condición límite de equilibrio. De manera similar, el ángulo de fricción interna genera variaciones entre 1.015 y 1.262, mostrando una relación directa con el FS cuando aumenta su valor.

El peso unitario mantiene una relación inversa con el FS. Cuando γ disminuye, el FS aumenta hasta 1.280; mientras que, cuando γ se incrementa, el FS disminuye hasta 1.023. Esto confirma que el aumento del peso propio del material reduce el margen de estabilidad.

Dentro del análisis determinístico de sensibilidad individual, el coeficiente sísmico horizontal kh presentó la mayor amplitud de respuesta desfavorable en la cresta bajo condición pseudoestática. Al pasar de kh = 0.000 a kh = 0.350, el FS disminuye de 1.393 a 1.016. Aunque la cresta no cae por debajo de FS = 1.00, los valores obtenidos con

kh = 0.2625 y kh = 0.350 muestran una condición muy cercana al equilibrio límite.

En conjunto, el análisis de sensibilidad en la zona de cresta muestra que el FS responde de manera diferenciada a la variación de los parámetros geotécnicos y al incremento del coeficiente sísmico horizontal dentro de los escenarios evaluados. La sección permanece por encima de FS = 1.00 en los escenarios evaluados, aunque presenta una reducción importante del margen respecto del equilibrio límite bajo condición pseudoestática y no alcanza necesariamente el umbral normativo de referencia.

4.5.2. *Análisis de sensibilidad en la zona media*

Se desarrolló considerando como escenario base el modelo correspondiente a esta sección del talud, con $\gamma = 15.57$ kN/m³, $c = 0.85$ kPa y $\varphi = 33.00°$, valor adoptado en el modelamiento a partir del redondeo de $\varphi = 33.36°$ obtenido experimentalmente.

En la condición estática se evaluó la variación individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, manteniendo constante la geometría del modelo y los demás parámetros geotécnicos.

Tabla 27

Análisis de sensibilidad en condición estática – zona media

Variable evaluada	-20 %	-10 %	Base	+10 %	+20 %	Tendencia
Cohesión, c	0.536	0.549	0.560	0.570	0.579	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	0.450	0.505	0.560	0.620	0.688	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	0.584	0.571	0.560	0.549	0.540	A mayor γ, menor FS

Nota. El análisis fue realizado en Slide V6.004, variando un parámetro a la vez y manteniendo constantes los demás valores del modelo.

Del análisis de la Tabla 27 se observa que, bajo condición estática, la zona media mantiene factores de seguridad inferiores a 1.00 en todos los escenarios evaluados. Esto confirma que esta sección presenta una condición inestable aun cuando se incrementan favorablemente los parámetros resistentes.

La cohesión presenta una sensibilidad relativa reducida sobre el FS, debido a que el valor base de c = 0.85 kPa es muy bajo. Al variar la cohesión entre -20 % y +20 %, el FS cambia de 0.536 a 0.579, lo que evidencia una mejora limitada de la estabilidad.

El ángulo de fricción interna es el parámetro que genera mayor variación favorable en la zona media. Cuando φ disminuye en 20 %, el FS baja a 0.450; mientras que, al

incrementarse en 20 %, el FS sube hasta 0.688. Sin embargo, incluso en el escenario más favorable, el FS no alcanza la unidad.

El peso unitario mantiene una relación inversa con el FS. Cuando γ disminuye en 20 %, el FS aumenta a 0.584; mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS disminuye hasta 0.540. Esta tendencia confirma que el aumento del peso propio del material incrementa las fuerzas actuantes y reduce la estabilidad.

En la condición **pseudoestática** se evaluó nuevamente la variación de c, φ y γ, considerando como escenario base kh = 0.175 y kv = 0.00. Además, se analizó la sensibilidad del FS frente a diferentes valores del coeficiente sísmico horizontal kh.

Tabla 28

Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – zona media

Variable evaluada	-20 % / Bajo	-10 % / Medio bajo	Base	+10 % / Medio alto	+20 % / Alto	Tendencia
Cohesión, c	0.402	0.416	0.423	0.433	0.442	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	0.346	0.383	0.423	0.465	0.510	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	0.449	0.434	0.423	0.416	0.407	A mayor γ, menor FS
Coeficiente sísmico, kh	0.560	0.488	0.423	0.371	0.325	A mayor kh, menor FS

Nota. Para el coeficiente sísmico horizontal se consideraron los valores kh = 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625 y 0.350. El valor base corresponde a kh = 0.175.

Del análisis de la Tabla 28 se observa que la zona media presenta una condición crítica en todos los escenarios pseudoestáticos evaluados. El FS base es FS = 0.423, valor inferior a la unidad, lo que indica insuficiencia de resistencia dentro del modelo bajo la acción sísmica horizontal simplificada.

Respecto a la cohesión, el FS varía entre 0.402 y 0.442, evidenciando que el incremento de c aumenta ligeramente el FS; sin embargo, todos los resultados permanecen por debajo de FS = 1.00. Esto se debe al valor muy reducido de cohesión asignado a la zona media.

El ángulo de fricción interna presenta una mayor sensibilidad relativa en comparación con la cohesión. Cuando φ disminuye en 20 %, el FS baja hasta 0.346;

mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS aumenta hasta 0.510. A pesar de esta mejora, el talud continúa por debajo de la condición límite de equilibrio.

El peso unitario mantiene una relación inversa con el FS. Al disminuir γ, el FS aumenta hasta 0.449; mientras que, al incrementarse, el FS disminuye hasta 0.407. Esto muestra que el aumento del peso propio del material contribuye a reducir la estabilidad del talud.

El coeficiente sísmico horizontal kh genera una reducción importante del FS. Al pasar de kh = 0.000 a kh = 0.350, el FS disminuye de 0.560 a 0.325. Esta tendencia confirma que la zona media presenta una reducción marcada del FS conforme aumenta la acción sísmica horizontal simplificada.

En conjunto, los resultados del análisis de sensibilidad muestran que la zona media mantiene una condición crítica dentro de los escenarios evaluados. Aunque el aumento del ángulo de fricción interna mejora el FS, ningún escenario evaluado alcanza FS = 1.00, por lo que esta zona se mantiene inestable tanto en condición estática como pseudoestática.

4.5.3. *Análisis de sensibilidad en el pie del talud*

Se desarrolló considerando como escenario base el modelo correspondiente a esta sección, con γ = 20.06 kN/m³, c = 13.87 kPa y φ = 31.00°, valor adoptado en el modelamiento a partir del redondeo de φ = 30.73° obtenido experimentalmente. El escenario estático base presentó FS = 1.129, valor superior al equilibrio límite FS = 1.00, pero inferior al factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

En la condición estática se evaluó la variación individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, manteniendo constante la geometría del modelo y los demás parámetros geotécnicos.

Tabla 29

Análisis de sensibilidad en condición estática – pie del talud

Variable evaluada	-20 %	-10 %	Base	+10 %	+20 %	Tendencia
Cohesión, c	1.029	1.070	1.129	1.184	1.238	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	0.992	1.059	1.129	1.201	1.295	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	1.264	1.191	1.129	1.073	1.044	A mayor γ, menor FS

Nota. El análisis fue realizado en Slide V6.004, variando un parámetro a la vez y manteniendo constantes los demás valores del modelo.

Del análisis de la Tabla 29 se observa que, bajo condición estática, el pie del talud presenta un FS base de 1.129, valor ligeramente superior a la unidad. Esto indica que la resistencia disponible supera a la requerida para el equilibrio límite; sin embargo, el resultado permanece por debajo del factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

La cohesión presenta una relación directa con el FS. Cuando c disminuye en 20 %, el FS baja a 1.029; mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS aumenta hasta 1.238. Esta tendencia confirma que el incremento de la cohesión mejora la estabilidad del pie del talud.

El ángulo de fricción interna genera una variación más marcada. Cuando φ disminuye en 20 %, el FS baja hasta 0.992, valor ligeramente menor que la unidad. Esto indica que una reducción desfavorable del ángulo de fricción puede llevar al pie del talud a una condición inestable. En cambio, cuando φ aumenta en 20 %, el FS alcanza 1.295, mostrando una mejora importante de la estabilidad.

El peso unitario presenta una relación inversa con el FS. Cuando γ disminuye en 20 %, el FS aumenta a 1.264; mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS disminuye hasta 1.044. Esto evidencia que el aumento del peso propio del material reduce el margen de estabilidad del pie del talud.

En la condición pseudoestática se evaluó nuevamente la variación de c, φ y γ, considerando como escenario base kh = 0.175 y kv = 0.00. Además, se analizó la sensibilidad del FS frente a diferentes valores del coeficiente sísmico horizontal kh.

Tabla 30

Análisis de sensibilidad en condición pseudoestática – pie del talud

Variable evaluada	-20 % / Bajo	-10 % / Medio bajo	Base	+10 % / Medio alto	+20 % / Alto	Tendencia
Cohesión, c	0.920	0.973	1.000	1.035	1.059	A mayor c, mayor FS
Ángulo de fricción, φ	0.835	0.903	1.000	1.101	1.158	A mayor φ, mayor FS
Peso unitario, γ	1.059	1.040	1.000	0.941	0.937	A mayor γ, menor FS
Coeficiente sísmico, kh	1.129	1.027	1.000	0.915	0.808	A mayor kh, menor FS

Nota. Para el coeficiente sísmico horizontal se consideraron los valores kh = 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625 y 0.350. El valor base corresponde a kh = 0.175.

Del análisis de la Tabla 30 se observa que el pie del talud presenta una condición crítica bajo el escenario pseudoestático base, debido a que el factor de seguridad es FS = 1.000. Este valor coincide con la condición límite de equilibrio, por lo que no existe margen adicional de seguridad.

Respecto a la cohesión, el FS varía entre 0.920 y 1.059. Esto indica que una reducción de c puede llevar al pie del talud por debajo de la unidad, mientras que un incremento de la cohesión aumenta el margen respecto del equilibrio límite.

El ángulo de fricción interna presenta una sensibilidad relativa importante sobre el FS del pie del talud. Cuando φ disminuye en 20 %, el FS baja hasta 0.835; mientras que, al incrementarse en 20 %, el FS aumenta hasta 1.158. Esta variación evidencia que el ángulo de fricción es uno de los parámetros más sensibles en esta sección.

El peso unitario mantiene una relación inversa con el FS. Cuando γ disminuye, el FS aumenta hasta 1.059; mientras que, cuando γ se incrementa, el FS disminuye hasta 0.937. Esto confirma que el aumento del peso propio del material reduce el FS del pie del talud, especialmente bajo condición pseudoestática.

El coeficiente sísmico horizontal kh genera una reducción considerable del FS. Al pasar de kh = 0.000 a kh = 0.350, el FS disminuye de 1.129 a 0.808. Esta tendencia muestra que el pie del talud es sensible al incremento de la acción sísmica horizontal simplificada dentro de los escenarios evaluados.

En conjunto, el análisis de sensibilidad muestra que el pie del talud presenta una respuesta cercana al equilibrio límite dentro de varios de los escenarios evaluados. En condición estática, el factor de seguridad base FS = 1.129 supera la unidad, pero permanece por debajo del factor mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia. En condición pseudoestática, el escenario base alcanza FS = 1.000, correspondiente al equilibrio límite. Asimismo, las variaciones desfavorables de c y φ, los incrementos de γ y el aumento de kh pueden reducir el FS por debajo de la unidad dentro de los rangos analizados.

4.5.4. *Resumen general del análisis de sensibilidad*

El análisis de sensibilidad permitió comparar la respuesta de las tres secciones representativas frente a la modificación individual de los parámetros geotécnicos y del coeficiente sísmico horizontal. La evaluación se realizó empleando la geometría

bidimensional común de referencia, manteniendo constantes las demás variables cuando se modificó el parámetro analizado. Por ello, los resultados permiten aislar la respuesta local del factor de seguridad dentro de los rangos considerados.

Tabla 31

Resumen general de los parámetros con mayor respuesta del FS

Zona evaluada	Condición	Parámetro con mayor respuesta	Rango de FS observado	Interpretación principal
Cresta	Estática	Peso unitario, γ	1.252 – 1.591	El aumento del peso unitario reduce el margen de seguridad
Cresta	Pseudoestática	Coeficiente sísmico, kh	1.016 – 1.393	El incremento de kh reduce considerablemente el FS
Zona media	Estática	Ángulo de fricción, φ	0.450 – 0.688	φ produjo la mayor variación del FS dentro del rango evaluado
Zona media	Pseudoestática	Coeficiente sísmico, kh	0.325 – 0.560	El incremento de kh produjo la mayor reducción del FS dentro del rango evaluado.
Pie del talud	Estática	Ángulo de fricción, φ	0.992 – 1.295	Una reducción de φ puede llevar la sección a inestabilidad
Pie del talud	Pseudoestática	Ángulo de fricción interna, φ	0.835 – 1.158	φ presentó la mayor variación del FS, ligeramente superior a la producida por kh.

Nota. El rango de FS corresponde a los valores mínimo y máximo obtenidos durante la variación individual de cada parámetro. La identificación del parámetro con mayor respuesta es válida para los rangos evaluados y la geometría común de referencia, y no constituye una jerarquía universal de sensibilidad para todo el sector.

En la cresta, el peso unitario generó la mayor variación del FS bajo condición estática, mientras que en condición pseudoestática el coeficiente kh presentó la respuesta más marcada. En la zona media, el ángulo de fricción interna produjo la mayor variación bajo condición estática y kh bajo condición pseudoestática. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna presentó la mayor variación bajo condición estática y, bajo condición pseudoestática, una amplitud ligeramente superior a la obtenida para kh.

Estos resultados muestran que la influencia de los parámetros no es uniforme entre las secciones y que no resulta técnicamente adecuado atribuir el FS crítico de la zona media únicamente a su baja cohesión mediante una comparación entre zonas. La comparación entre parámetros representativos describe una asociación entre condiciones geotécnicas y FS; la influencia individual se evalúa mediante el análisis de sensibilidad, donde cada variable fue modificada de manera aislada.

En consecuencia, dentro de los rangos de sensibilidad adoptados, el análisis determinístico mostró que la modificación individual de c, φ y γ produce cambios en el FS estático y pseudoestático de las secciones evaluadas, mientras que la variación de kh modifica adicionalmente la respuesta bajo condición pseudoestática. De manera complementaria y exploratoria, la simulación Monte Carlo permitió evaluar la respuesta del FS cuando las variables de entrada variaron simultáneamente dentro de las distribuciones de escenario adoptadas y cuantificar su sensibilidad relativa mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Estos resultados corresponden a la respuesta del modelo y no constituyen inferencia poblacional ni caracterización de la variabilidad espacial real del terreno.

4.5.5. *Análisis integrado de la respuesta paramétrica y de la sensibilidad estadística de la respuesta simulada para la contrastación de las hipótesis específicas 4 y 5*

Para la contrastación integrada de las hipótesis específicas 4 y 5 se consideraron dos niveles complementarios de análisis. En primer lugar, se emplearon los resultados determinísticos del análisis de sensibilidad obtenidos para las secciones de cresta, zona media y pie del talud, modificando individualmente cada parámetro y manteniendo constantes la geometría y las demás variables del modelo. En segundo lugar, se incorporó el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada mediante 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección y condición, utilizando como indicadores la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional. Ambos niveles se interpretaron dentro de los rangos y escenarios de modelamiento adoptados y no como observaciones geotécnicas independientes ni como evidencia inferencial sobre la población de taludes.

La magnitud de la respuesta se cuantificó mediante la amplitud absoluta del factor de seguridad (ΔFS) y la amplitud relativa respecto al factor de seguridad base (ARFS). De manera complementaria, la pendiente y el coeficiente de determinación R^2 se emplearon para describir la dirección y el ajuste de la tendencia dentro del intervalo evaluado, mientras que el coeficiente de Spearman (ρs) se utilizó únicamente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica del ordenamiento de los cinco escenarios. Estos indicadores no se interpretan como evidencia inferencial, demostración causal ni estimación poblacional.

4.5.5.1. Contrastación integrada de la hipótesis específica 4

Tabla 32

Síntesis del análisis determinístico de sensibilidad para la hipótesis específica 4

Sección	Parámetro	ΔFS	ARFS (%)	R^2	ρs
Cresta	Cohesión, c	0.325	23.33	0.9997	+1.000
Cresta	Ángulo de fricción, φ	0.268	19.24	0.9983	+1.000
Cresta	Peso unitario, γ	0.339	24.34	0.9878	−1.000
Zona media	Cohesión, c	0.043	7.68	0.9949	+1.000
Zona media	Ángulo de fricción, φ	0.238	42.50	0.9979	+1.000
Zona media	Peso unitario, γ	0.044	7.86	0.9960	−1.000
Pie del talud	Cohesión, c	0.209	18.51	0.9972	+1.000
Pie del talud	Ángulo de fricción, φ	0.303	26.84	0.9953	+1.000
Pie del talud	Peso unitario, γ	0.220	19.49	0.9790	−1.000

Nota. ΔFS corresponde a la amplitud absoluta del FS, calculada como FSmáx − FSmín; ARFS corresponde a la amplitud relativa respecto al FS del escenario base; R^2 corresponde al ajuste lineal descriptivo dentro de los cinco escenarios modelados; y ρs corresponde al coeficiente de correlación por rangos de Spearman empleado únicamente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica de la respuesta. Los valores corresponden a escenarios determinísticos de sensibilidad y no constituyen resultados inferenciales sobre la población de taludes.

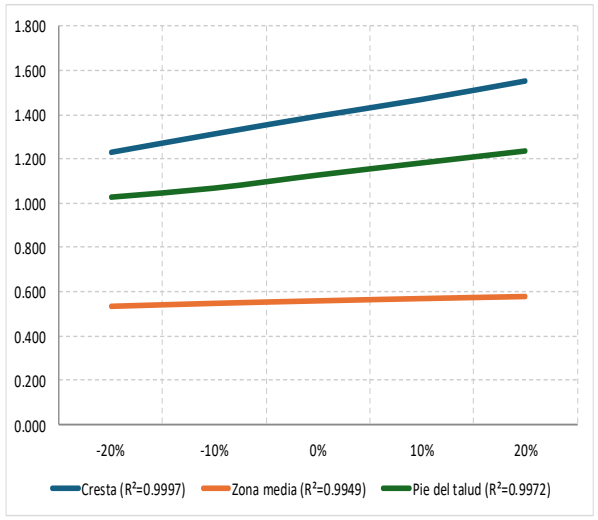
La Figura 20 complementa la síntesis anterior mediante la representación gráfica de la respuesta del FS frente a las variaciones controladas de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario en las tres secciones evaluadas.

Figura 20

Variación del FS frente a cambios en los parámetros geotécnicos bajo condición estática

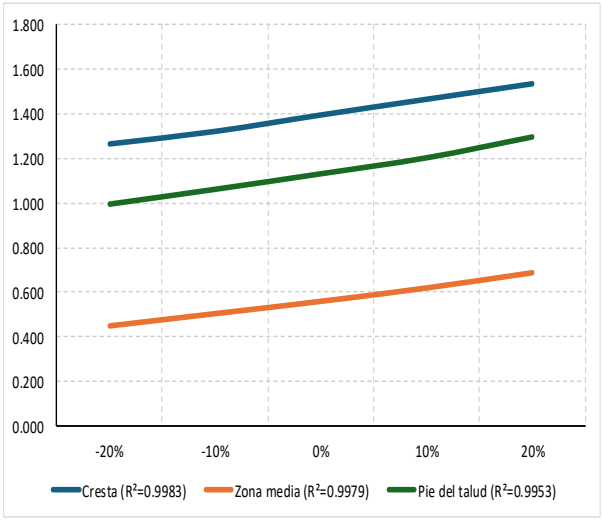
a) Cohesión vs. factor de seguridad

Variación (%)	Cresta (R^2=0.9997)	Zona media (R^2=0.9949)	Pie del talud (R^2=0.9972)
-20%	1.228	0.536	1.029
-10%	1.312	0.549	1.070
0%	1.393	0.560	1.129
10%	1.469	0.570	1.184
20%	1.553	0.579	1.238



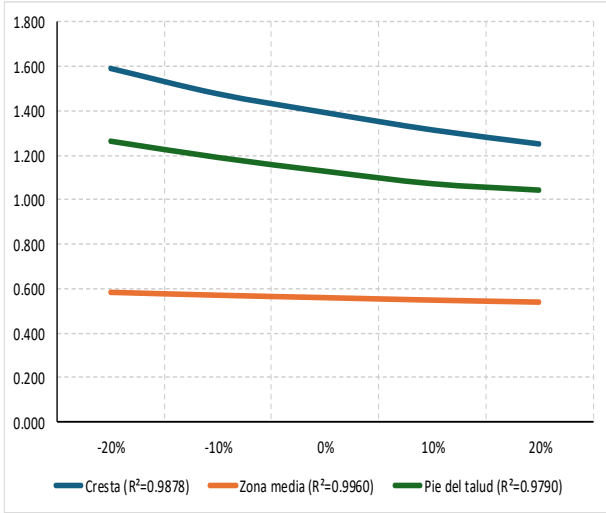
b) Ángulo de fricción interna vs. factor de seguridad

Variación (%)	Cresta (R^2=0.9983)	Zona media (R^2=0.9979)	Pie del talud (R^2=0.9953)
-20%	1.264	0.450	0.992
-10%	1.320	0.505	1.059
0%	1.393	0.560	1.129
10%	1.463	0.620	1.201
20%	1.532	0.688	1.295



c) Peso unitario vs. factor de seguridad

Variación (%)	Cresta (R^2=0.9878)	Zona media (R^2=0.9960)	Pie del talud (R^2=0.9790)
-20%	1.591	0.584	1.264
-10%	1.477	0.571	1.191
0%	1.393	0.560	1.129
10%	1.315	0.549	1.073
20%	1.252	0.540	1.044



Nota. Los gráficos representan la respuesta del FS frente a variaciones individuales de ±20 %, ±10 % y el valor base de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, manteniendo constantes los demás parámetros del modelo. Los valores de R^2 corresponden al ajuste lineal descriptivo dentro de los cinco escenarios evaluados y no se interpretan como inferencia poblacional.

Los resultados de la Tabla 32 muestran que la magnitud de la respuesta del FS no fue uniforme entre los parámetros ni entre las secciones evaluadas. En la cresta, el peso unitario presentó la mayor amplitud de respuesta bajo condición estática, con ΔFS = 0.339 y ARFS = 24.34 %, seguido de la cohesión con ΔFS = 0.325 y ARFS = 23.33 %. En la zona media, el ángulo de fricción interna fue claramente el parámetro con mayor respuesta, alcanzando ΔFS = 0.238 y ARFS = 42.50 %, mientras que la cohesión y el peso unitario presentaron amplitudes relativas de 7.68 % y 7.86 %, respectivamente. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna volvió a presentar la mayor respuesta, con ΔFS = 0.303 y ARFS = 26.84 %.

Los ajustes lineales descriptivos presentaron coeficientes R^2 comprendidos entre 0.9790 y 0.9997, mostrando tendencias consistentes del FS frente a los niveles de variación considerados. La cohesión y el ángulo de fricción interna mostraron tendencias crecientes del FS, mientras que el peso unitario presentó una tendencia decreciente. Esta dirección fue descrita complementariamente mediante Spearman, obteniéndose $\rho s = +1.000$ para la cohesión y el ángulo de fricción interna y $\rho s = -1.000$ para el peso unitario en las tres secciones. Estos coeficientes representan únicamente el ordenamiento monotónico de los escenarios determinísticos evaluados.

Como complemento del análisis determinístico anterior, se aplicó un análisis estadístico de sensibilidad sobre las 10 000 realizaciones Monte Carlo de cada sección bajo condición estática. Los resultados de la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación se presentan en la Tabla 33.

Tabla 33

Análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo para la hipótesis específica 4

Sección	Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cresta	Cohesión, c	0.5752	0.5888	34.7
Cresta	Ángulo de fricción, φ	0.4831	0.4968	24.47
Cresta	Peso unitario, γ	−0.6239	−0.6411	40.83
Zona media	Cohesión, c	0.1544	0.1802	2.41
Zona media	Ángulo de fricción, φ	0.9682	0.9817	94.66
Zona media	Peso unitario, γ	−0.1704	−0.1842	2.93
Pie del talud	Cohesión, c	0.4594	0.4836	22.18

Sección	Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Pie del talud	Ángulo de fricción, φ	0.6993	0.7317	51.38
Pie del talud	Peso unitario, γ	−0.5017	−0.5253	26.45

Nota. Los coeficientes corresponden al análisis estadístico de sensibilidad aplicado a 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección. La correlación de rango describe la dirección y magnitud de la asociación entre cada entrada y el FS; β corresponde al coeficiente de regresión beta estandarizado; y la contribución proporcional expresa la participación relativa de cada variable en la propagación de la respuesta simulada. Estos indicadores caracterizan la sensibilidad del modelo dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados y no constituyen inferencia estadística poblacional.

De manera complementaria, se aplicó el análisis estadístico de sensibilidad a las 10 000 realizaciones Monte Carlo correspondientes a la condición estática. La correlación de rango y los coeficientes beta estandarizados mostraron una respuesta diferenciada según la sección evaluada. En la cresta, el peso unitario presentó la mayor magnitud de asociación con el FS (correlación de rango = −0.6239; β estandarizado = −0.6411), seguido de la cohesión (0.5752; 0.5888) y el ángulo de fricción interna (0.4831; 0.4968). En la zona media, el ángulo de fricción interna presentó un predominio marcado (correlación de rango = 0.9682; β estandarizado = 0.9817), mientras que la cohesión y el peso unitario mostraron magnitudes considerablemente menores. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna volvió a presentar la mayor sensibilidad relativa (correlación de rango = 0.6993; β estandarizado = 0.7317), seguido del peso unitario y la cohesión.

La contribución proporcional a la propagación mostró una jerarquización consistente con los coeficientes de correlación de rango y beta estandarizados. En la cresta, el peso unitario representó el 40.83 % de la contribución relativa a la respuesta simulada del FS, la cohesión el 34.70 % y el ángulo de fricción interna el 24.47 %. En la zona media, el ángulo de fricción interna concentró el 94.66 %, frente al 2.93 % del peso unitario y 2.41 % de la cohesión. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna alcanzó el 51.38 %, seguido del peso unitario con 26.45 % y la cohesión con 22.18 %. Estos porcentajes corresponden a la propagación de la respuesta dentro del modelo y de los rangos de escenario adoptados, y no representan porcentajes de variabilidad geotécnica espacial del terreno.

En términos de contrastación, ambos niveles de análisis mostraron una respuesta coherente dentro de los rangos modelados. El análisis determinístico evidenció cambios sistemáticos del FS frente a la modificación controlada de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, mientras que el análisis estadístico de sensibilidad

Monte Carlo mostró una dirección de respuesta coherente con el análisis determinístico y permitió cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de dichas variables cuando variaron simultáneamente dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.

En la cresta, el peso unitario presentó la mayor sensibilidad relativa; en la zona media y en el pie del talud predominó el ángulo de fricción interna. En consecuencia, los resultados respaldan la hipótesis específica 4 dentro de las secciones, condiciones y rangos modelados. Esta contrastación caracteriza la respuesta del modelo y no constituye una prueba de significancia poblacional ni permite generalizar estadísticamente los resultados a la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

4.5.5.2. Contrastación integrada de la hipótesis específica 5

La contrastación integrada de la hipótesis específica 5 consideró, en primer lugar, los resultados determinísticos del análisis de sensibilidad bajo condición pseudoestática, obtenidos mediante la modificación individual de la cohesión (c), el ángulo de fricción interna (φ), el peso unitario (γ) y el coeficiente sísmico horizontal (kh), manteniendo constantes la geometría y los demás parámetros del modelo. En segundo lugar, estos resultados se complementaron con el análisis estadístico de sensibilidad de 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección, mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional, con la finalidad de evaluar la sensibilidad relativa de las entradas cuando varían simultáneamente dentro de los rangos de escenario adoptados.

Para la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario se consideraron cinco niveles correspondientes a −20 %, −10 %, valor base, +10 % y +20 %. Estas perturbaciones representan escenarios controlados de sensibilidad paramétrica y no mediciones de variabilidad espacial real del terreno. Para el coeficiente sísmico horizontal se evaluaron los valores kh = 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500, con la finalidad de describir la respuesta del FS frente a distintos niveles de acción pseudoestática simplificada.

La magnitud de la respuesta se evaluó mediante ΔFS y ARFS; la dirección y el ajuste de la tendencia mediante la pendiente y R^2; y el coeficiente de Spearman se empleó únicamente como indicador descriptivo del ordenamiento monotónico de los escenarios. Estos indicadores se interpretan exclusivamente dentro de las condiciones y rangos modelados.

Tabla 34

Síntesis del análisis determinístico de sensibilidad para la hipótesis específica 5

Sección	Parámetro	ΔFS	ARFS (%)	R^2	ρs
Cresta	Cohesión, c	0.253	22.10	0.9974	+1.000
Cresta	Ángulo de fricción, φ	0.247	21.57	0.9986	+1.000
Cresta	Peso unitario, γ	0.257	22.45	0.9961	−1.000
Cresta	Coeficiente sísmico horizontal, kh	0.377	32.93	0.9478	−1.000
Zona media	Cohesión, c	0.040	9.46	0.9896	+1.000
Zona media	Ángulo de fricción, φ	0.164	38.77	0.9986	+1.000
Zona media	Peso unitario, γ	0.042	9.93	0.9789	−1.000
Zona media	Coeficiente sísmico horizontal, kh	0.235	55.56	0.9912	−1.000
Pie del talud	Cohesión, c	0.139	13.90	0.9796	+1.000
Pie del talud	Ángulo de fricción, φ	0.323	32.30	0.9922	+1.000
Pie del talud	Peso unitario, γ	0.122	12.20	0.9469	−1.000
Pie del talud	Coeficiente sísmico horizontal, kh	0.321	32.10	0.9713	−1.000

Nota. ΔFS corresponde a la amplitud absoluta del FS, calculada como FSmáx − FSmín; ARFS corresponde a la amplitud relativa respecto al FS del escenario base; R^2 corresponde al ajuste lineal descriptivo dentro de los cinco escenarios modelados; y ρs corresponde al coeficiente de correlación por rangos de Spearman utilizado únicamente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica de la respuesta. Para c, φ y γ se consideraron perturbaciones de −20 %, −10 %, valor base, +10 % y +20 %; para kh se emplearon los niveles 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500. Los resultados corresponden a escenarios determinísticos de sensibilidad y no constituyen inferencia estadística ni caracterización probabilística de la población de taludes.

La Figura 21 complementa la síntesis anterior mediante la representación gráfica de la respuesta del FS pseudoestático frente a las variaciones controladas de los parámetros geotécnicos y del coeficiente sísmico horizontal en las tres secciones evaluadas.

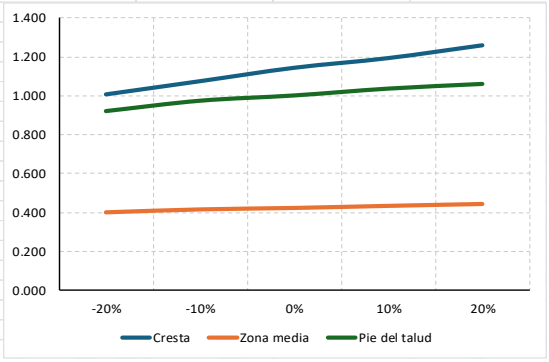
Figura 21

Variación del FS frente a cambios en los parámetros geotécnicos y sísmicos bajo condición pseudoestática

a) Cohesión vs. factor de seguridad pseudoestático

Variación (%)	Cresta	Zona media	Pie del talud
-20%	1.008	0.402	0.920
-10%	1.076	0.416	0.973
0%	1.145	0.423	1.000
10%	1.195	0.433	1.035
20%	1.261	0.442	1.059

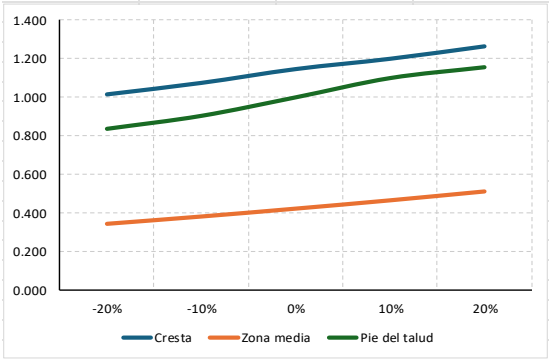
R²	Cresta	Zona media	Pie del talud
Valor	0.9974	0.9896	0.9796



b) Ángulo de fricción interna vs. factor de seguridad pseudoestático

Variación (%)	Cresta	Zona media	Pie del talud
-20%	1.015	0.346	0.835
-10%	1.074	0.383	0.903
0%	1.145	0.423	1.000
10%	1.198	0.465	1.101
20%	1.262	0.510	1.158

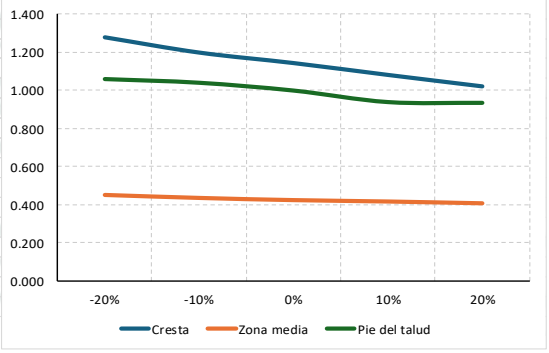
R²	Cresta	Zona media	Pie del talud
Valor	0.9986	0.9986	0.9922



c) Peso unitario vs. factor de seguridad pseudoestático

Variación (%)	Cresta	Zona media	Pie del talud
-20%	1.280	0.449	1.059
-10%	1.200	0.434	1.040
0%	1.145	0.423	1.000
10%	1.083	0.416	0.941
20%	1.023	0.407	0.937

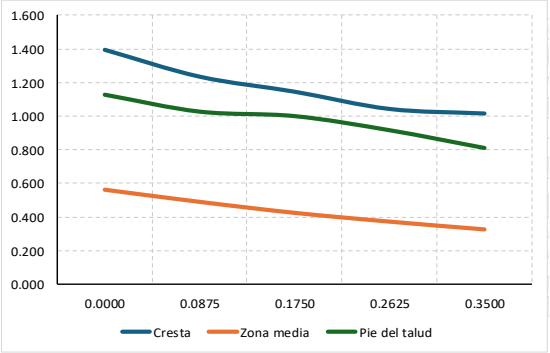
R²	Cresta	Zona media	Pie del talud
Valor	0.9961	0.9789	0.9469



d) Coeficiente sísmico horizontal vs. factor de seguridad

kh	Cresta	Zona media	Pie del talud
0.0000	1.393	0.560	1.129
0.0875	1.234	0.488	1.027
0.1750	1.145	0.423	1.000
0.2625	1.043	0.371	0.915
0.3500	1.016	0.325	0.808

R²	Cresta	Zona media	Pie del talud
Valor	0.9478	0.9912	0.9713



Nota. Los indicadores se interpretan exclusivamente dentro de los escenarios paramétricos modelados. Los gráficos representan la respuesta del FS frente a variaciones individuales de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario de −20 %, −10 %, 0 %, +10 % y +20 %. Para el coeficiente sísmico horizontal se utilizaron los niveles kh = 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500. En cada caso se mantuvieron constantes los demás parámetros del modelo. Los valores de R^2 corresponden al ajuste lineal descriptivo dentro de los cinco escenarios evaluados.

Los resultados de la Tabla 34 y la Figura 21 muestran que la magnitud de la respuesta del FS pseudoestático fue diferente según el parámetro y la sección evaluada. En la cresta, el coeficiente sísmico horizontal kh presentó la mayor amplitud, con ΔFS = 0.377 y ARFS = 32.93 %. En la zona media, kh produjo también la mayor respuesta, con ΔFS = 0.235 y ARFS = 55.56 %, seguido del ángulo de fricción interna con ΔFS = 0.164 y ARFS = 38.77 %. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna presentó la mayor

amplitud, con ΔFS = 0.323 y ARFS = 32.30 %, seguido muy de cerca por kh con ΔFS = 0.321 y ARFS = 32.10 %.

Los ajustes lineales descriptivos presentaron valores de R^2 comprendidos entre 0.9469 y 0.9986, mostrando una respuesta consistente dentro de los intervalos analizados. La cohesión y el ángulo de fricción interna presentaron tendencias crecientes del FS, mientras que el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal mostraron tendencias decrecientes. Complementariamente, el coeficiente de Spearman presentó ρs = +1.000 para la cohesión y el ángulo de fricción interna y ρs = −1.000 para el peso unitario y kh en las tres secciones. Estos valores describen el ordenamiento monotónico de los cinco escenarios determinísticos y no se interpretan como evidencia inferencial sobre una población geotécnica.

Como complemento del análisis determinístico anterior, se aplicó un análisis estadístico de sensibilidad sobre las 10 000 realizaciones Monte Carlo de cada sección bajo condición pseudoestática. Los resultados de la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35

Análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo para la hipótesis específica 5

Sección	Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cresta	Cohesión, c	0.4962	0.4807	25.53
Cresta	Ángulo de fricción, ϕ	0.4634	0.4595	22.27
Cresta	Peso unitario, γ	−0.5021	−0.4824	26.14
Cresta	Coeficiente sísmico, kh	−0.5013	−0.4951	26.06
Zona media	Cohesión, c	0.144	0.1516	2.46
Zona media	Ángulo de fricción, ϕ	0.6036	0.6312	38.06
Zona media	Peso unitario, γ	−0.1399	−0.1588	2.04
Zona media	Coeficiente sísmico, kh	−0.7434	−0.7395	57.73
Pie del talud	Cohesión, c	0.2626	0.2653	7.13
Pie del talud	Ángulo de fricción, ϕ	0.5888	0.6182	35.85

Pie del talud	Peso unitario, γ	−0.2165	−0.2291	4.85
Pie del talud	Coeficiente sísmico, kh	−0.7102	−0.7175	52.17

Nota. Los coeficientes corresponden al análisis estadístico de sensibilidad aplicado a 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección bajo condición pseudoestática. La correlación de rango describe la dirección y magnitud de la asociación entre cada variable de entrada y el FS; β corresponde al coeficiente de regresión beta estandarizado; y la contribución proporcional expresa la participación relativa de cada variable en la propagación de la respuesta simulada. Estos indicadores caracterizan la sensibilidad del modelo dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados y no constituyen inferencia estadística poblacional ni caracterización probabilística espacial del terreno.

Los resultados del análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo mostraron comportamientos diferenciados entre las tres secciones bajo condición pseudoestática. En la cresta, las magnitudes de la correlación de rango y de los coeficientes beta estandarizados fueron similares para las cuatro variables, sin evidenciarse un predominio marcado de un único parámetro. La correlación de rango alcanzó valores de −0.5021 para γ, −0.5013 para kh, +0.4962 para c y +0.4634 para φ; mientras que los coeficientes beta estandarizados fueron −0.4951 para kh, −0.4824 para γ, +0.4807 para c y +0.4595 para φ. En la zona media, el coeficiente sísmico horizontal presentó la mayor sensibilidad relativa (correlación de rango = −0.7434; β estandarizado = −0.7395), seguido del ángulo de fricción interna (0.6036; 0.6312). En el pie del talud, kh volvió a presentar la mayor magnitud de sensibilidad (correlación de rango = −0.7102; β estandarizado = −0.7175), seguido del ángulo de fricción interna (0.5888; 0.6182).

La contribución proporcional a la propagación mostró el mismo patrón general. En la cresta, la respuesta se distribuyó de manera relativamente equilibrada entre el peso unitario (26.14 %), el coeficiente sísmico horizontal (26.06 %), la cohesión (25.53 %) y el ángulo de fricción interna (22.27 %), por lo que no se identificó un parámetro claramente dominante. En la zona media, kh presentó la mayor contribución relativa, con 57.73 %, seguido de φ con 38.06 %, mientras que c y γ mostraron contribuciones reducidas de 2.46 % y 2.04 %, respectivamente. En el pie del talud, kh alcanzó una contribución de 52.17 %, seguido de φ con 35.85 %, c con 7.13 % y γ con 4.85 %. Estos resultados indican que la incorporación de la acción pseudoestática modifica la jerarquía relativa de sensibilidad según la sección evaluada, sin que dichas contribuciones representen porcentajes de variabilidad geotécnica espacial del terreno.

En términos de contrastación, ambos niveles de análisis mostraron una respuesta coherente dentro de los rangos modelados. El análisis determinístico evidenció cambios

sistemáticos del FS pseudoestático frente a la modificación controlada de c, φ, γ y kh, mientras que el análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo mostró una dirección de respuesta coherente con el análisis determinístico y permitió cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de las variables cuando variaron simultáneamente dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. En la cresta no se identificó un predominio marcado de una única variable, mientras que en la zona media y en el pie del talud el coeficiente sísmico horizontal presentó la mayor sensibilidad relativa, seguido principalmente por el ángulo de fricción interna. En consecuencia, los resultados respaldan la hipótesis específica 5 dentro de las secciones, condiciones y rangos modelados. Esta contrastación caracteriza la respuesta del modelo y no constituye una prueba de significancia poblacional ni permite generalizar estadísticamente los resultados a la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

4.6. Simulación Monte Carlo complementaria

Se desarrolló como un procedimiento complementario y exploratorio al modelamiento determinístico y al análisis de sensibilidad. Su finalidad fue evaluar la respuesta del FS frente a la variación simultánea de los parámetros de entrada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados para cada sección. Además de caracterizar la distribución simulada del FS, las realizaciones generadas se utilizaron para desarrollar el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta del modelo.

El procedimiento principal de la investigación continúa siendo el análisis bidimensional determinístico mediante Slide V6.004. El análisis de sensibilidad determinístico permitió evaluar individualmente el efecto de cada parámetro, mientras que la simulación Monte Carlo mediante ModelRisk permitió combinar simultáneamente las variables de entrada y complementar su interpretación mediante estadísticos descriptivos y medidas de sensibilidad. Estas últimas comprendieron la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación de la respuesta. La simulación Monte Carlo no reemplaza el modelamiento determinístico, sino que amplía la interpretación de la respuesta del modelo dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.

Debido a la disponibilidad limitada de ensayos mecánicos independientes, las distribuciones VosePERT utilizadas se interpretan como distribuciones de escenario definidas mediante valores mínimo, más probable y máximo. No corresponden a distribuciones poblacionales ajustadas estadísticamente para todo el barrio La Recoleta.

Por esta razón, los resultados no se presentan como una probabilidad de falla absoluta ni como un análisis formal de confiabilidad del talud, sino como indicadores complementarios de la frecuencia con que el modelo genera valores por debajo del umbral mecánico FS = 1.00.

La distribución VosePERT se seleccionó como una distribución de escenario acotada, debido a que permite representar cada parámetro mediante tres valores definidos explícitamente: mínimo, valor más probable y máximo. En esta investigación, el valor más probable corresponde al parámetro representativo utilizado en el modelo determinístico de cada sección, mientras que los valores mínimo y máximo corresponden a los límites inferior y superior del rango exploratorio adoptado. Esta elección permite propagar simultáneamente los rangos paramétricos definidos sin asumir que se dispone de una función de distribución empírica obtenida de una muestra estadísticamente suficiente.

En consecuencia, la utilización de VosePERT responde a una finalidad exploratoria de propagación de escenarios y no a un ajuste probabilístico de las propiedades geotécnicas del sitio. Debido al número limitado de ensayos mecánicos independientes, no fue técnicamente posible estimar con confiabilidad distribuciones poblacionales específicas, parámetros estadísticos robustos o estructuras de correlación espacial para c, φ y γ. Por ello, los resultados de la simulación se interpretan como la respuesta del modelo ante combinaciones aleatorias dentro de rangos previamente definidos y no como probabilidades absolutas de ocurrencia en el terreno.

Para el coeficiente sísmico horizontal kh, los límites de la distribución no se definieron mediante el criterio ±20 %. Se adoptaron kh = 0.000 como límite inferior, kh = 0.175 como valor más probable correspondiente al escenario pseudoestático base y kh = 0.350 como límite superior, en coherencia con los niveles previamente evaluados en el análisis de sensibilidad sísmica. Estos valores representan escenarios de solicitación pseudoestática simplificada y no una distribución empírica de aceleraciones sísmicas obtenida mediante un estudio de peligro sísmico específico del sitio.

Tabla 36

Criterios generales considerados para la simulación Monte Carlo

Criterio	Descripción
Software empleado	ModelRisk

Criterio	Descripción
Método	Simulación Monte Carlo complementaria y exploratoria
Número de simulaciones	10 000 realizaciones por escenario
Escenarios	Cresta, zona media y pie; cada sección en condición estática y pseudoestática
Parámetros variables	Estático: c, φ y γ. Pseudoestático: c, φ, γ y kh. El coeficiente kv se mantuvo fijo en 0.00.
Distribuciones de entrada	VosePERT empleadas como distribuciones de escenario acotadas mediante valores mínimo, más probable y máximo; no corresponden a distribuciones empíricas ajustadas de la población geotécnica.
Variable de respuesta	Factor de seguridad, FS
Indicadores de distribución del FS	Media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar, coeficiente de variación (COV), percentil 5 (P5), percentil 95 (P95) y proporción de realizaciones con FS < 1.00.
Indicadores de sensibilidad estadística	Correlación de rango entre las variables de entrada y el FS, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional a la propagación de la respuesta simulada.
Alcance interpretativo	Explorar la propagación simultánea de los rangos paramétricos adoptados, caracterizar la distribución simulada del FS y evaluar la sensibilidad relativa de las variables de entrada dentro del modelo. Los resultados no constituyen caracterización probabilística espacial, análisis formal de confiabilidad, estimación de probabilidad absoluta de falla ni inferencia estadística poblacional.

Nota. FS<1.00 se utiliza como referencia del umbral mecánico de equilibrio dentro de la simulación. La proporción de resultados por debajo de ese valor se interpreta como indicador de escenarios desfavorables del modelo y no como criterio único de cumplimiento normativo.

Tabla 37

Parámetros de entrada utilizados en la simulación Monte Carlo

Zona	Parámetro	Unidad	Mínimo	Más probable	Máximo	Distribución	Escenario
Cresta	Cohesión (c)	kPa	11.71	14.64	17.57	VosePERT	Estático y pseudoestático
Cresta	Ángulo de fricción interna (φ)	°	22.40	28.00	33.60	VosePERT	Estático y pseudoestático
Cresta	Peso unitario (γ)	kN/m³	10.22	12.78	15.34	VosePERT	Estático y pseudoestático
Zona media	Cohesión (c)	kPa	0.68	0.85	1.02	VosePERT	Estático y pseudoestático
Zona media	Ángulo de fricción interna (φ)	°	26.40	33.00	39.60	VosePERT	Estático y pseudoestático

Zona media	Peso unitario (γ)	kN/m³	12.46	15.57	18.68	VosePERT	Estático y pseudoestático
Pie del talud	Cohesión (c)	kPa	11.10	13.87	16.64	VosePERT	Estático y pseudoestático
Pie del talud	Ángulo de fricción interna (φ)	°	24.80	31.00	37.20	VosePERT	Estático y pseudoestático
Pie del talud	Peso unitario (γ)	kN/m³	16.05	20.06	24.07	VosePERT	Estático y pseudoestático
Todas las zonas	Coeficiente sísmico horizontal (k_h)	Adimensional	0.000	0.175	0.350	VosePERT	Solo pseudoestático

Nota. Para c, φ y γ, el valor más probable corresponde al parámetro representativo empleado en el modelamiento determinístico de cada sección, mientras que los valores mínimo y máximo corresponden a perturbaciones de −20 % y +20 %, respectivamente. Dichos límites constituyen rangos exploratorios de sensibilidad y no intervalos empíricos de variabilidad espacial. Para kh se utilizaron como mínimo, valor más probable y máximo los valores 0.000, 0.175 y 0.350, respectivamente, conforme a los escenarios pseudoestáticos evaluados. Las distribuciones VosePERT se utilizan únicamente para propagar estos rangos dentro de la simulación exploratoria y no representan distribuciones poblacionales calibradas del sitio.

Para el desarrollo de la simulación Monte Carlo, los valores aleatorios de cohesión, ángulo de fricción interna, peso unitario y, en los escenarios pseudoestáticos, coeficiente sísmico horizontal, fueron generados mediante distribuciones VosePERT. En cada iteración se determinó la variación relativa del parámetro simulado respecto a su valor base mediante la siguiente expresión:

$$R_x = \frac{x_{sim} - x_{base}}{x_{base}}$$

Donde:

R_x: Representa la variación relativa del parámetro

x_{sim}: Corresponde al valor generado aleatoriamente

x_{base}: Corresponde al valor más probable utilizado en el modelamiento determinístico.

El FS simulado se estimó mediante una aproximación lineal local construida a partir de los resultados del análisis de sensibilidad desarrollado previamente en Slide V6.004. Para los escenarios estáticos se empleó la siguiente expresión:

$$FS_{\text{sim}} = FS_{\text{base}} + \beta_c R_c + \beta_\varphi R_\varphi + \beta_\gamma R_\gamma$$

Para los escenarios pseudoestáticos se incorporó adicionalmente la influencia del coeficiente sísmico horizontal:

$$FS_{\text{sim}} = FS_{\text{base}} + \beta_c R_c + \beta_\varphi R_\varphi + \beta_\gamma R_\gamma + \beta_{kh} R_{kh}$$

Donde:

FS_{base}**:** Corresponde al factor de seguridad determinístico obtenido en Slide V6.004

R_c**,** R_φ**,** R_γ**y** R_{kh}**:** Representan las variaciones relativas de los parámetros

β_c**,** β_φ**,** β_γ**y** β_{kh}**:** Representan los coeficientes de sensibilidad asociados a cada variable.

Los coeficientes correspondientes a la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario fueron obtenidos a partir de la variación del FS entre los escenarios de −20 % y +20 %, dividida entre una variación relativa total de 0.40. Para el coeficiente sísmico horizontal, el coeficiente de sensibilidad se obtuvo mediante la diferencia entre el FS calculado con $k_h = 0.350$y el FS base correspondiente a $k_h = 0.175$.

Este procedimiento constituye un modelo aproximado de respuesta utilizado para propagar los rangos paramétricos de entrada adoptados. Por tanto, la simulación no implicó la ejecución directa de Slide V6.004 en cada una de las 10 000 iteraciones, sino el empleo de los factores de seguridad determinísticos y de los resultados del análisis de sensibilidad como base para estimar la respuesta simulada del FS mediante ModelRisk.

La simulación Monte Carlo se organizó por zonas representativas del talud. Primero se evaluó la zona de cresta, luego la zona media y finalmente el pie del talud. En cada caso se interpretaron los estadísticos principales del FS y la proporción de escenarios en los que el resultado fue menor que la condición límite de equilibrio.

Es importante precisar que los resultados de la simulación Monte Carlo no reemplazan al análisis determinístico desarrollado previamente, sino que complementan la interpretación de la respuesta del modelo. En este sentido, la simulación permitió caracterizar la distribución del FS, identificar la frecuencia relativa de realizaciones con FS < 1.00 y evaluar la sensibilidad relativa de las variables de entrada mediante la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación. Estos resultados se interpretan exclusivamente dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.

4.6.1. *Validación del modelo aproximado de respuesta*

Con la finalidad de verificar el desempeño del modelo aproximado de respuesta empleado en la simulación Monte Carlo, se efectuó una validación complementaria mediante ejecuciones directas en Slide V6.004. La validación tuvo como propósito comparar los factores de seguridad estimados mediante la función aproximada utilizada en ModelRisk con aquellos obtenidos directamente mediante el método de Spencer, manteniendo sin modificación la geometría, el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y las demás condiciones de cada modelo.

Para ello, se definieron tres casos de validación por cada sección y condición de análisis: un caso desfavorable, un caso favorable y un caso mixto. Las combinaciones utilizaron exclusivamente niveles paramétricos previamente considerados en el análisis de sensibilidad, sin incorporar rangos adicionales. A diferencia del análisis de sensibilidad individual, en estos casos los parámetros fueron modificados simultáneamente, con la finalidad de reproducir de manera más cercana la forma en que las variables se combinan durante la simulación Monte Carlo.

Para cada combinación se obtuvo un FS mediante la función aproximada utilizada en ModelRisk y un FS mediante una ejecución directa en Slide V6.004. El desempeño de la aproximación se evaluó mediante el error absoluto y el error relativo porcentual entre ambos resultados. El desarrollo de las ecuaciones, coeficientes de sensibilidad y cálculos individuales se presenta en el Anexo 15.

Tabla 38

Validación del modelo aproximado de respuesta mediante comparación con Slide V6.004

Zona / condición	Caso	FS aproximado	FS Slide	Error absoluto	Error relativo (%)
Cresta estática	Desfavorable	0.927	0.987	0.06	6.08
Cresta estática	Favorable	1.859	1.943	0.084	4.32
Cresta estática	Mixto	1.322	1.32	0.002	0.15
Cresta pseudoestática	Desfavorable	0.637	0.807	0.17	21.07
Cresta pseudoestática	Favorable	1.588	1.577	0.011	0.7

Zona / condición	Caso	FS aproximado	FS Slide	Error absoluto	Error relativo (%)
Cresta pseudoestática	Mixto	1.017	1.074	0.057	5.31
Zona media estática	Desfavorable	0.398	0.416	0.018	4.33
Zona media estática	Favorable	0.722	0.745	0.023	3.09
Zona media estática	Mixto	0.501	0.506	0.005	0.99
Zona media pseudoestática	Desfavorable	0.202	0.317	0.115	36.28
Zona media pseudoestática	Favorable	0.595	0.56	0.035	6.25
Zona media pseudoestática	Mixto	0.333	0.384	0.051	13.28
Pie estático	Desfavorable	0.763	0.816	0.053	6.5
Pie estático	Favorable	1.495	1.555	0.06	3.86
Pie estático	Mixto	1.051	1.059	0.008	0.76
Pie pseudoestático	Desfavorable	0.516	0.731	0.215	29.41
Pie pseudoestático	Favorable	1.388	1.329	0.059	4.44
Pie pseudoestático	Mixto	0.828	0.903	0.075	8.31

Nota. El FS aproximado corresponde al valor estimado mediante la función de respuesta empleada en ModelRisk, mientras que el FS Slide corresponde a una ejecución directa mediante el método de Spencer. Los casos de validación emplearon combinaciones simultáneas de niveles paramétricos previamente definidos en el análisis de sensibilidad. El error relativo se calculó respecto del FS obtenido directamente en Slide V6.004.

Los resultados muestran que, en condición estática, el modelo aproximado presentó errores relativos comprendidos entre 0.15 % y 6.50 %, con un error relativo promedio de aproximadamente 3.34 %. Este comportamiento evidencia una adecuada proximidad entre la respuesta estimada mediante la función lineal y los factores de seguridad obtenidos directamente en Slide V6.004 para los casos estáticos evaluados.

En condición pseudoestática se observaron mayores diferencias, con errores relativos comprendidos entre 0.70 % y 36.28 % y un promedio aproximado de 13.89 %. Las mayores desviaciones se presentaron en los casos desfavorables de las tres secciones, particularmente en la zona media y el pie del talud. Este comportamiento indica que, bajo las combinaciones extremas evaluadas, la aproximación lineal reproduce con menor precisión la respuesta conjunta de los parámetros geotécnicos y del coeficiente sísmico horizontal, por lo que dichos escenarios requieren una mayor cautela interpretativa.

A pesar de estas diferencias, en los 18 casos de validación la función aproximada y las ejecuciones directas en Slide coincidieron en la clasificación respecto del umbral mecánico FS = 1.00; es decir, no se observaron casos en los que un método indicara FS < 1.00 y el otro FS ≥ 1.00. No obstante, esta coincidencia no elimina las diferencias cuantitativas identificadas, especialmente en condición pseudoestática.

En consecuencia, la simulación Monte Carlo se mantiene como un análisis complementario y exploratorio de propagación de los rangos paramétricos adoptados. Los resultados no sustituyen las evaluaciones directas realizadas en Slide V6.004 ni constituyen una estimación formal de confiabilidad o probabilidad absoluta de falla. La validación realizada permite delimitar explícitamente el desempeño y las limitaciones del modelo aproximado utilizado en ModelRisk. En este mismo alcance deben interpretarse los indicadores de sensibilidad estadística obtenidos a partir de las realizaciones Monte Carlo, dado que la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional describen la respuesta del modelo aproximado dentro de los rangos de escenario adoptados.

4.6.2. *Simulación Monte Carlo en condición estática*

Se desarrolló considerando la variación simultánea de los parámetros geotécnicos dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados para cada sección. Para esta condición no se incorporó acción sísmica, por lo que los resultados representan la respuesta simulada del FS frente a las combinaciones generadas de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario.

Tabla 39

Resultados de la simulación Monte Carlo en condición estática

Zona evaluada	Media FS	Mediana FS	Mínimo	Máximo	Desv. estándar	COV	P5	P95	Simulaciones con FS<1.00

Cresta	1.39	1.39	1.05	1.75	0.10	0.07	1.22	1.56	0.00 %
Zona media	0.56	0.56	0.43	0.69	0.05	0.08	0.48	0.64	100.00 %
Pie del talud	1.13	1.13	0.84	1.40	0.08	0.07	0.99	1.26	≈ 5.00 %

Nota. Los resultados corresponden a 10 000 simulaciones realizadas en ModelRisk. La proporción de simulaciones con FS<1.00 representa los escenarios en los que el FS fue menor que la condición límite de equilibrio.

Del análisis de la Tabla 39 se observa que la cresta presenta un FS medio de 1.39, coincidente con la mediana, lo que evidencia una distribución centrada alrededor del valor determinístico obtenido previamente. El rango de resultados varía entre 1.05 y 1.75, manteniéndose en todos los casos por encima de FS = 1.00. Por ello, la proporción de simulaciones críticas en la cresta fue 0.00 %.

En la zona media, el FS medio fue 0.56, con una mediana también de 0.56. Los valores simulados se encuentran entre 0.43 y 0.69, todos inferiores a la condición límite de equilibrio. En consecuencia, el 100.00 % de las realizaciones presentó FS < 1.00, resultado coherente con la identificación de la zona media como la sección con la respuesta más desfavorable bajo condición estática.

En el pie del talud, el FS medio fue 1.13, con valores simulados entre 0.84 y 1.40. Aunque la media es superior a la unidad, el percentil 5 fue aproximadamente 0.99, valor muy cercano a la condición límite de equilibrio. Además, alrededor del 5.00 % de las simulaciones presentó FS<1.00, lo que evidencia una condición de estabilidad limitada.

Los coeficientes de variación obtenidos para el FS simulado fueron 0.07 en la cresta, 0.08 en la zona media y 0.07 en el pie del talud. Estos valores describen exclusivamente la dispersión relativa de la variable de salida FS en cada escenario Monte Carlo. No representan coeficientes de variación empíricos de la cohesión, el ángulo de fricción interna o el peso unitario, ni constituyen una demostración estadística de la variabilidad espacial general del talud.

En condición estática, el 0.00 % de las simulaciones de la cresta, el 100.00 % de la zona media y aproximadamente el 5.00 % del pie del talud presentaron FS<1.00. Estos porcentajes complementan la tendencia observada en los resultados determinísticos y permiten identificar la frecuencia de escenarios que cruzan el umbral mecánico de equilibrio dentro de los rangos asumidos. La evaluación de cumplimiento respecto de

factores de seguridad mínimos de diseño se realiza con el criterio técnico definido para la interpretación del FS y no se sustituye por esta proporción Monte Carlo.

4.6.3. *Simulación Monte Carlo en condición pseudoestática*

Se desarrolló considerando la variación simultánea de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal kh dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Los parámetros geotécnicos se representaron mediante distribuciones VosePERT con valores mínimo, más probable y máximo definidos para cada sección del talud. Para kh se adoptó un valor mínimo de 0.000, un valor más probable de 0.175 y un valor máximo de 0.350, mientras que el coeficiente sísmico vertical kv se mantuvo fijo en 0.00.

Los resultados fueron obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones por sección. La distribución simulada del FS se interpretó mediante sus principales estadísticos descriptivos, percentiles y la proporción de realizaciones con FS < 1.00. De manera complementaria, la sensibilidad relativa de las variables de entrada se evaluó mediante la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación, conforme al procedimiento estadístico definido previamente.

Tabla 40

Resultados de la simulación Monte Carlo en condición pseudoestática

Zona evaluada	Media FS	Mediana FS	Mínimo	Máximo	Desv. estándar	COV	P5	P95	Simulaciones con FS<1.00
Cresta	1.14	1.14	0.80	1.52	0.10	0.08	0.98	1.30	≈ 8.00 %
Zona media	0.42	0.42	0.26	0.59	0.05	0.12	0.34	0.50	100.00 %
Pie del talud	1.00	1.00	0.69	1.34	0.10	0.10	0.83	1.17	≈ 50.00 %

Nota. Los resultados corresponden a 10 000 simulaciones realizadas en ModelRisk para cada sección representativa. En los escenarios pseudoestáticos, el coeficiente sísmico horizontal kh fue considerado como variable aleatoria mediante una distribución VosePERT con valor mínimo de 0.000, valor más probable de 0.175 y valor máximo de 0.350. El coeficiente vertical kv se mantuvo fijo en 0.00.

Del análisis de la Tabla 40 se observa que la cresta presenta una media de FS = 1.14 y una mediana de FS = 1.14, valores superiores a la condición límite de equilibrio. Sin embargo, el percentil 5 fue P5 = 0.98, lo que indica que una fracción reducida de las simulaciones puede ubicarse por debajo de FS = 1.00. En este caso, aproximadamente el

8.00 % de los escenarios simulados presentó valores menores a la unidad.

En la zona media, la media y la mediana del FS fueron 0.42, con valores simulados entre 0.26 y 0.59. Asimismo, los percentiles P5 = 0.34 y P95 = 0.50 se encuentran por debajo de la unidad. Esto evidencia que el 100.00 % de las realizaciones presentó FS < 1.00, resultado coherente con la identificación de la zona media como la sección con la respuesta más desfavorable bajo condición pseudoestática.

En el pie del talud, la media y la mediana fueron FS = 1.00, lo que indica que la distribución se encuentra centrada en la condición límite de equilibrio. Sin embargo, el percentil 5 fue P5 = 0.83, mientras que el percentil 95 fue P95 = 1.17. Esto muestra una dispersión importante alrededor del valor límite, con aproximadamente el 50.00 % de las realizaciones por debajo de FS = 1.00 dentro del escenario simulado.

En condición pseudoestática, los coeficientes de variación del FS simulado fueron 0.08 en la cresta, 0.12 en la zona media y 0.10 en el pie del talud. Al igual que en el escenario estático, estos indicadores describen la dispersión de la respuesta simulada FS dentro de cada sección y no deben interpretarse como coeficientes de variación poblacionales de los parámetros geotécnicos.

La proporción de simulaciones con FS < 1.00 fue aproximadamente 8.00 % en la cresta, 100.00 % en la zona media y 50.00 % en el pie del talud. La incorporación de kh como variable de escenario desplaza las distribuciones hacia valores menores del FS, con un aumento de resultados por debajo del umbral mecánico de equilibrio en la cresta y, especialmente, en el pie. Estos resultados tienen carácter complementario y exploratorio y no se interpretan como una probabilidad de falla absoluta del sitio.

4.6.4. *Comparación de los resultados simulados entre condición estática y pseudoestática*

Permite observar cómo cambia la distribución del FS al incorporar la condición pseudoestática. Para esta comparación se emplearon la media del FS y la proporción de simulaciones con FS<1.00 de cada sección. En los escenarios pseudoestáticos, kh fue representado mediante una distribución VosePERT con mínimo 0.000, valor más probable 0.175 y máximo 0.350; por tanto, kh = 0.175 no fue un valor constante en todas las iteraciones, sino el valor más probable de la distribución adoptada.

Tabla 41

Comparación de los resultados simulados entre condición estática y pseudoestática

Zona evaluada	Media FS estático	Media FS pseudoestático	Reducción media del FS	Simulaciones FS<1.00 estático	Simulaciones FS<1.00 pseudoestático	Interpretación
Cresta	1.39	1.14	0.25	0.00 %	≈ 8.00 %	La distribución se desplaza a valores menores y aparecen resultados con FS<1.00.
Zona media	0.56	0.42	0.14	100.00 %	100.00 %	Toda la distribución permanece por debajo de FS = 1.00 y la media disminuye.
Pie del talud	1.13	1.00	0.13	≈ 5.00 %	≈ 50.00 %	Aumenta marcadamente la proporción de resultados por debajo de FS = 1.00.

Nota. La reducción media se calculó como la diferencia entre la media del FS estático y la media del FS pseudoestático. La proporción de FS<1.00 se utiliza como indicador de resultados por debajo del umbral mecánico de equilibrio dentro de cada escenario simulado.

En la cresta, la media disminuyó de 1.39 a 1.14 y la proporción de resultados con FS < 1.00 pasó de 0.00 % a aproximadamente 8.00 %. En la zona media, la media disminuyó de 0.56 a 0.42 y el 100.00 % de las simulaciones permaneció por debajo de la unidad en ambas condiciones. En el pie del talud, la media disminuyó de 1.13 a 1.00 y la proporción de resultados con FS<1.00 aumentó de aproximadamente 5.00 % a 50.00 %.

Por tanto, la simulación complementaria muestra una respuesta más desfavorable al incorporar la condición pseudoestática. Esta comparación global de las distribuciones no se utiliza por sí sola para atribuir la influencia de una variable específica, debido a que en las realizaciones Monte Carlo los parámetros de entrada varían simultáneamente. La jerarquización de la sensibilidad relativa de cada variable se sustenta de manera integrada en el análisis determinístico de sensibilidad y en el análisis estadístico de sensibilidad Monte Carlo, mediante la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación de la respuesta.

4.6.5. *Interpretación general de la simulación Monte Carlo*

Complementó los resultados determinísticos y de sensibilidad mediante la generación de distribuciones del FS para seis escenarios de modelamiento diferenciados: cresta, zona media y pie del talud, cada uno bajo condición estática y pseudoestática. Su interpretación se centra en la posición y dispersión de la respuesta simulada respecto de FS = 1.00, así como en la sensibilidad relativa de las variables de entrada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados, sin utilizar dicho umbral como sustituto de los factores de seguridad mínimos de diseño establecidos en el criterio técnico de la

investigación.

Tabla 42

Interpretación general de los resultados obtenidos mediante Monte Carlo

Zona evaluada	Condición estática	Condición pseudoestática	Interpretación complementaria
Cresta	0.00 % con FS<1.00	≈ 8.00 % con FS<1.00	La condición pseudoestática introduce una fracción de resultados bajo el umbral mecánico; no se infiere cumplimiento normativo a partir del porcentaje.
Zona media	100.00 % con FS<1.00	100.00 % con FS<1.00	La respuesta simulada permanece completamente por debajo del umbral mecánico en ambos escenarios.
Pie del talud	≈ 5.00 % con FS<1.00	≈ 50.00 % con FS<1.00	La condición pseudoestática incrementa de forma marcada la frecuencia de resultados bajo el umbral mecánico.

Nota. La proporción de simulaciones con FS<1.00 es un indicador complementario de la respuesta del modelo dentro de los rangos asumidos. No constituye por sí sola una clasificación normativa, un índice de confiabilidad ni una probabilidad de falla absoluta del talud.

La cresta presenta la distribución relativa más favorable de las tres secciones en los escenarios simulados: no registró resultados con FS<1.00 en condición estática y presentó aproximadamente 8.00 % bajo condición pseudoestática. Sin embargo, esta observación no implica calificar automáticamente la sección como estable o conforme a un criterio de diseño únicamente porque la mayoría de los valores sean superiores a la unidad.

La zona media presenta la respuesta más desfavorable, con 100.00 % de los resultados simulados por debajo de FS = 1.00 tanto en condición estática como pseudoestática. En este caso, la simulación complementaria es coherente con los factores de seguridad determinísticos inferiores a la unidad y muestra que, dentro de los rangos de escenario adoptados, la respuesta permanece por debajo del equilibrio límite.

En el pie del talud, la proporción de resultados con FS<1.00 aumenta de aproximadamente 5.00 % en condición estática a 50.00 % en condición pseudoestática. Este cambio evidencia una respuesta especialmente desfavorable frente a la incorporación de la condición pseudoestática y a la variación simultánea de los parámetros considerados.

En conjunto, la simulación Monte Carlo complementa la interpretación de los resultados determinísticos y del análisis de sensibilidad mediante dos componentes. El primero corresponde a la caracterización de la distribución simulada del FS y de la frecuencia de realizaciones ubicadas por debajo del umbral mecánico FS = 1.00. El

segundo corresponde al análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada, mediante la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación, los cuales permiten cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de c, φ, γ y, en condición pseudoestática, kh dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Estos resultados complementan, pero no sustituyen, el análisis determinístico realizado en Slide V6.004 y no se interpretan como inferencia estadística poblacional ni como caracterización probabilística espacial del terreno.

4.7. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos permiten discutir la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional de las secciones representativas del talud del barrio La Recoleta a partir de tres niveles de análisis complementarios. El análisis determinístico mediante Slide V6.004 y el método de Spencer constituye el procedimiento principal para establecer los factores de seguridad de referencia; el análisis de sensibilidad determinístico permite aislar la respuesta del FS frente a la modificación individual de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y, en condición pseudoestática, el coeficiente sísmico horizontal; finalmente, la simulación Monte Carlo mediante ModelRisk complementa la interpretación al considerar la variación simultánea de las variables de entrada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados y permite, además, evaluar estadísticamente la sensibilidad relativa de dichas variables mediante la correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación. Esta integración permite diferenciar la respuesta individual de cada parámetro de su comportamiento simultáneo dentro del modelo, sin atribuir carácter poblacional o espacial a los resultados simulados.

La discusión se organiza de acuerdo con los objetivos específicos de la investigación. En consecuencia, primero se analiza la variabilidad física y mecánica identificada entre la cresta, la zona media y el pie del talud; luego se interpretan los resultados estáticos y pseudoestáticos; posteriormente se examina la influencia individual de los parámetros mediante sensibilidad; y, finalmente, se integran estos hallazgos con el análisis Monte Carlo complementario, señalando el alcance y las principales limitaciones del estudio. Esta organización permite contrastar los resultados con los antecedentes sin limitar la discusión a señalar coincidencias, incorporando también diferencias metodológicas, restricciones de representatividad e implicancias para la evaluación geotécnica del sector.

4.7.1. *Contrastación integrada de las hipótesis de investigación*

Se realizó mediante la integración de los resultados experimentales, determinísticos, del análisis de sensibilidad y de la simulación Monte Carlo obtenidos para las tres secciones representativas del talud. Para las hipótesis específicas 4 y 5, la evaluación incorporó además el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional a la propagación. Debido al carácter no probabilístico del muestreo geotécnico y a que las realizaciones Monte Carlo corresponden a simulaciones numéricas del modelo y no a observaciones independientes del terreno, estos indicadores no se utilizaron como pruebas de significancia poblacional. Para cada hipótesis se definió el procedimiento aplicado, la evidencia o indicador considerado, el criterio de decisión y el resultado de la contrastación.

Tabla 43

Contrastación integrada de las hipótesis de investigación

Hipótesis	Procedimiento	Evidencia / indicador	Criterio de decisión	Resultado
H1	Comparación de los parámetros representativos c, φ y γ obtenidos para cresta, zona media y pie.	Cresta: c=14.64 kPa, φ=27.94°, γ=12.78 kN/m³. Media: c=0.85 kPa, φ=33.36°, γ=15.57 kN/m³. Pie: c=13.87 kPa, φ=30.73°, γ=20.06 kN/m³.	La hipótesis se respalda si se observan valores diferenciados de uno o más parámetros entre las secciones evaluadas.	Respaldada técnicamente para las tres secciones representativas. Las diferencias observadas no se generalizan estadísticamente a todos los taludes de La Recoleta.
H2	Modelamiento determinístico estático mediante Slide V6.004, método de Spencer y parámetros representativos de cada sección.	FS estático: cresta=1.393; media=0.560; pie=1.129.	La hipótesis se respalda si los FS estáticos obtenidos para las secciones modeladas presentan valores diferenciados.	Respaldada en términos comparativos del modelo. La zona media presentó la condición más desfavorable. Debido a que se empleó una geometría bidimensional común de referencia, las diferencias entre los factores de seguridad de las tres secciones se asocian principalmente a los parámetros geotécnicos diferenciados asignados a la cresta, zona media y pie, dentro de las condiciones de modelamiento adoptadas.
H3	Comparación pareada entre condición estática y pseudoestática, manteniendo geometría y parámetros geotécnicos e incorporando kh=0.175 y kv=0.00.	Cresta: 1.393→1.145; media: 0.560→0.423; pie: 1.129→1.000.	La hipótesis se respalda si FS pseudoestático < FS estático en las tres secciones.	Respaldada técnicamente. La incorporación del escenario pseudoestático produjo reducción del FS en las tres secciones evaluadas.
H4	Análisis integrado bajo condición estática: sensibilidad determinística individual de c, φ y γ mediante Slide V6.004 y análisis estadístico de	**Determinístico:** ΔFS, ARFS, pendiente, R^2 y Spearman descriptivo. **Monte Carlo:** correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. En la cresta predominó γ (β = −0.6411; contribución = 40.83 %); en	La hipótesis se respalda si el análisis determinístico evidencia cambios sistemáticos del FS frente a la modificación controlada de los parámetros y el análisis estadístico Monte Carlo muestra una dirección coherente y permite	Respaldada dentro de las secciones y rangos modelados. En la cresta, el peso unitario presentó la mayor sensibilidad relativa; en la zona media y el pie del talud predominó el ángulo de fricción interna. Los resultados corresponden a la respuesta

Hipótesis	Procedimiento	Evidencia / indicador	Criterio de decisión	Resultado
	sensibilidad de 10 000 realizaciones Monte Carlo mediante ModelRisk.	la zona media predominó φ (β = 0.9817; 94.66 %); y en el pie predominó φ (β = 0.7317; 51.38 %).	cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de las variables dentro de los rangos adoptados.	del modelo y no constituyen inferencia poblacional.
H5	Análisis integrado bajo condición pseudoestática: sensibilidad determinística individual de c, φ, γ y kh mediante Slide V6.004 y análisis estadístico de sensibilidad de 10 000 realizaciones Monte Carlo mediante ModelRisk.	Determinístico: ΔFS, ARFS, pendiente, R^2 y Spearman descriptivo. Monte Carlo: correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. En la cresta se observó una sensibilidad distribuida entre γ, kh, c y φ, sin predominio marcado de una única variable. En la zona media predominó kh (β = −0.7395; contribución = 57.73 %), seguido de φ (38.06 %); y en el pie predominó kh (β = −0.7175; 52.17 %), seguido de φ (35.85 %).	La hipótesis se respalda si el análisis determinístico evidencia cambios sistemáticos del FS pseudoestático frente a la modificación controlada de c, φ, γ y kh, y el análisis estadístico Monte Carlo muestra una dirección coherente de la respuesta y permite cuantificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de las variables dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados.	Respaldada dentro de las secciones, condiciones y rangos modelados. En la cresta no se identificó un predominio marcado de una única variable; en la zona media y en el pie del talud, el coeficiente sísmico horizontal kh presentó la mayor sensibilidad relativa, seguido principalmente por el ángulo de fricción interna φ. Los resultados corresponden a la respuesta del modelo y no constituyen inferencia poblacional.
Hipótesis general	Integración de la caracterización geotécnica, el modelamiento determinístico estático y pseudoestático, el análisis de sensibilidad individual y el análisis estadístico de sensibilidad de las simulaciones Monte Carlo.	Diferencias en c, φ y γ entre secciones; factores de seguridad diferenciados; reducción del FS al incorporar la condición pseudoestática; respuesta sistemática del FS frente a cambios controlados de los parámetros; y jerarquización de la sensibilidad relativa mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional.	La hipótesis general se respalda si el conjunto de resultados de H1–H5 evidencia una respuesta diferenciada de la estabilidad frente a las condiciones geotécnicas y de modelamiento evaluadas, y si los análisis de sensibilidad permiten identificar y jerarquizar la sensibilidad relativa de las variables dentro de los rangos adoptados.	Respaldada dentro de las secciones y condiciones modeladas. Los resultados muestran diferencias geotécnicas entre las secciones, factores de seguridad diferenciados y cambios en la respuesta del FS frente a la variación de los parámetros y a la incorporación de kh. La jerarquización obtenida mediante el análisis estadístico Monte Carlo complementa esta interpretación, sin que ello implique inferencia poblacional ni generalización estadística a la totalidad de los taludes de La Recoleta.

Nota. La contrastación presentada integra resultados experimentales, determinísticos, del análisis de sensibilidad y de la simulación Monte Carlo. Para H4 y H5 se incorporaron adicionalmente indicadores de sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional. Estos indicadores se interpretan dentro de las condiciones, rangos y distribuciones de escenario adoptados y no constituyen pruebas de significancia poblacional ni permiten generalización estadística a la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

En conjunto, la evidencia obtenida respalda las cinco hipótesis específicas y, de manera integrada, la hipótesis general de investigación dentro de las secciones representativas y condiciones modeladas. La contrastación de H1, H2 y H3 se sustentó en la comparación directa de los parámetros geotécnicos y factores de seguridad obtenidos mediante ensayos y modelamiento determinístico. Por su parte, H4 y H5 se sustentaron mediante la integración del análisis determinístico de sensibilidad y del análisis estadístico de sensibilidad de las realizaciones Monte Carlo, lo que permitió evaluar la dirección, magnitud y jerarquía relativa de la respuesta de las variables dentro de los rangos adoptados. Estos resultados deben interpretarse considerando el carácter no probabilístico del muestreo geotécnico y no constituyen evidencia inferencial sobre la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

4.7.2. *Variabilidad física y mecánica de las secciones representativas*

La caracterización geotécnica mostró que las tres secciones evaluadas no presentan un conjunto único de propiedades representativas. En la cresta se obtuvieron experimentalmente un peso unitario de 12.78 kN/m³, una cohesión de 14.64 kPa y un ángulo de fricción interna de 27.94°; en la zona media, 15.57 kN/m³, 0.85 kPa y 33.36°, respectivamente; mientras que en el pie del talud se obtuvieron 20.06 kN/m³, 13.87 kPa y 30.73°.

Estas diferencias son coherentes con la heterogeneidad observada en las calicatas y con la presencia predominante de materiales granulares, arenas con limo, gravas, cantos y bloques en distintos niveles del perfil. Sin embargo, debido a que los parámetros mecánicos provienen de tres determinaciones independientes de corte directo, una por zona representativa, su comparación debe interpretarse como una caracterización diferenciada de las secciones analizadas y no como una distribución estadística suficiente para inferir la variabilidad espacial de toda la extensión del talud.

Este alcance distingue a la presente investigación de estudios que representan la variabilidad mediante un número mayor de ensayos, campos aleatorios o distribuciones estadísticas calibradas. Di Matteo et al. (2015) y Zhang et al. (2024), por ejemplo, resaltan que la variación espacial de las propiedades resistentes puede modificar la respuesta de estabilidad; no obstante, sus aproximaciones permiten una representación espacial o probabilística más amplia que la disponible en este trabajo. En la presente tesis, la existencia de diferencias entre las secciones se sustenta en la exploración y los ensayos

ejecutados, mientras que la cuantificación de la influencia de cada parámetro sobre el FS se desarrolla posteriormente mediante un análisis de sensibilidad local.

El valor de cohesión de aproximadamente 0.85 kPa obtenido para la zona media requiere una interpretación particular porque coincide con un ángulo de fricción interna mayor que el de las otras secciones. Esta combinación no es, por sí misma, contradictoria para un material predominantemente granular: la resistencia puede depender principalmente de la fricción entre partículas y presentar un componente cohesivo reducido. No obstante, el valor de cohesión no debe extrapolarse como una propiedad uniforme de toda la zona media, debido a que procede de una sola muestra representativa seleccionada para el ensayo de corte directo y, por tanto, expresa el comportamiento del material ensayado bajo las condiciones de preparación establecidas en laboratorio.

Además, las muestras empleadas en corte directo fueron alteradas y reconstituidas debido a la naturaleza suelta del material. La preparación incluyó acondicionamiento del material y conformación del espécimen en la caja de corte, procedimiento que permite ejecutar el ensayo bajo condiciones controladas, pero no reproduce de manera exacta la estructura, orientación de partículas, densificación local o contactos existentes in situ. Por esta razón, la cohesión de 0.85 kPa puede considerarse técnicamente plausible para el espécimen reconstituido de la zona media, pero su representatividad espacial y estructural es limitada. Esta precisión es especialmente importante porque una interpretación basada únicamente en ese valor podría sobredimensionar su papel en la explicación del FS obtenido.

Los parámetros de resistencia utilizados corresponden a la resistencia pico obtenida a partir del ensayo de corte directo consolidado drenado y de la envolvente construida con los esfuerzos normales aplicados. La investigación no determinó parámetros de resistencia residual; por consiguiente, el valor de cohesión de la zona media no debe interpretarse como una cohesión residual ni utilizarse para inferir directamente el comportamiento a grandes desplazamientos. La consistencia con las curvas esfuerzo cortante-desplazamiento se limita al uso de los valores máximos reportados para establecer la envolvente de resistencia. Esta limitación, junto con el número reducido de determinaciones mecánicas independientes, debe considerarse al interpretar las diferencias entre las tres secciones.

En este sentido, los resultados coinciden de manera general con la literatura que advierte que la estabilidad de taludes es sensible a la heterogeneidad de los parámetros

geotécnicos, pero el alcance metodológico es distinto. La presente investigación no reproduce un campo espacial continuo de c, φ y γ; en cambio, compara tres secciones representativas y utiliza la sensibilidad para estudiar la respuesta local del modelo. Esta diferencia metodológica explica por qué los hallazgos permiten identificar tendencias y sectores desfavorables, pero no establecer una ley universal de variabilidad para todo el barrio La Recoleta.

4.7.3. *Estabilidad bidimensional bajo condición estática*

Bajo condición estática, los factores de seguridad obtenidos mediante Slide V6.004 fueron 1.393 para la cresta, 0.560 para la zona media y 1.129 para el pie del talud. La comparación entre estos valores evidencia que la zona media constituye la sección con menor margen resistente dentro del modelo, mientras que la cresta presenta el mayor FS de las tres secciones y el pie ocupa una posición intermedia. Sin embargo, la interpretación no debe limitarse al criterio de equilibrio mecánico FS = 1.00. De acuerdo con el criterio de referencia adoptado previamente en la investigación, el valor mínimo considerado para condición estática es 1.50; por ello, ninguna de las tres secciones alcanza dicho valor de referencia, aunque la cresta y el pie presenten FS superiores a la unidad.

La zona media, con FS = 0.560, se encuentra por debajo de la unidad, lo que indica que, dentro de las hipótesis del modelo, las fuerzas resistentes disponibles resultan insuficientes respecto de las fuerzas actuantes en la superficie crítica calculada. El bajo valor de cohesión constituye una característica relevante de esta sección, pero no es técnicamente correcto atribuirle de manera exclusiva el FS obtenido. Entre la cresta, la zona media y el pie varían los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario; en cambio, para el modelamiento se mantuvo una geometría bidimensional común de referencia. En consecuencia, el FS determinístico representa la respuesta conjunta de los parámetros asignados al modelo y no el efecto aislado de una sola variable.

Esta precisión resulta importante para interpretar correctamente el comportamiento de la zona media. El hecho de que esta sección presente la menor cohesión y el menor factor de seguridad muestra una relación coherente entre ambos resultados; sin embargo, la influencia individual de cada parámetro debe evaluarse manteniendo constantes las demás variables. El análisis de sensibilidad realizado con la geometría bidimensional común de referencia mostró que, bajo condición estática, el ángulo de fricción interna produjo la mayor respuesta del FS en la zona media dentro del

rango evaluado. Por tanto, la baja cohesión contribuye a definir una condición base desfavorable, pero no constituye por sí sola la explicación completa del comportamiento estático de esta sección.

Los resultados pueden compararse con Bustillos Cotrado (2024), quien reportó un FS estático inferior a la unidad en un talud crítico de Huánuco, y con Durand Salas y Ramos Arias (2022), quienes evaluaron taludes arenosos mediante procedimientos determinísticos y probabilísticos. La semejanza principal radica en que los sectores con combinaciones geotécnicas y geométricas desfavorables pueden presentar factores de seguridad reducidos. No obstante, la comparación numérica directa debe realizarse con cautela, porque difieren la geometría, el origen de los materiales, las condiciones de borde, la exploración disponible y los procedimientos complementarios utilizados en cada estudio. En consecuencia, estos antecedentes respaldan la necesidad de considerar la caracterización específica del sitio, pero no constituyen valores patrón con los cuales el FS de La Recoleta deba coincidir.

La interpretación de los resultados estáticos también se encuentra condicionada por la profundidad de exploración. Las calicatas alcanzaron aproximadamente 1.50 m en la cresta y zona media y alrededor de 1.00 m en el pie del talud, mientras que las superficies críticas obtenidas en el modelamiento se extienden a profundidades mayores. Por ello, la continuidad de los parámetros geotécnicos por debajo de la profundidad directamente explorada constituye una hipótesis de modelamiento. El análisis representa las secciones con la información disponible, pero no sustituye una investigación profunda mediante perforaciones, ensayos in situ o métodos geofísicos que permitan definir con mayor detalle la estratigrafía y las propiedades mecánicas en profundidad.

Asimismo, no se instalaron piezómetros ni se realizaron mediciones directas de presión de poros. Los modelos finales fueron evaluados sin una superficie freática activa ni presión de poros incorporada, lo que corresponde a una condición de modelamiento y no a una demostración de ausencia permanente de agua en el terreno. En un talud ribereño, esta limitación es relevante porque cambios estacionales, infiltración o variaciones locales de humedad podrían modificar los esfuerzos efectivos y, por tanto, la estabilidad. Los factores de seguridad estáticos deben entenderse dentro de esta condición hidráulica asumida y de las demás simplificaciones del modelo bidimensional.

4.7.4. *Estabilidad bidimensional bajo condición pseudoestática*

La incorporación de la acción sísmica horizontal simplificada redujo el FS en las

tres secciones. Para el escenario base con kh = 0.175 y kv = 0.00, la cresta disminuyó de 1.393 a 1.145, la zona media de 0.560 a 0.423 y el pie del talud de 1.129 a 1.000. Estas variaciones representan reducciones aproximadas de 17.80 %, 24.46 % y 11.43 %, respectivamente. En consecuencia, el efecto pseudoestático no es uniforme en términos porcentuales, pero sí presenta una tendencia común: la incorporación de una fuerza horizontal equivalente disminuye el margen resistente calculado mediante el método de Spencer.

Al contrastar estos resultados con el criterio de referencia adoptado en la investigación para condición sísmica, equivalente a FS = 1.25, ninguna de las tres secciones alcanza dicho valor. La cresta conserva un FS superior a la unidad, pero con margen reducido respecto del equilibrio; la zona media permanece claramente por debajo de FS = 1.00; y el pie del talud alcanza exactamente FS = 1.000, por lo que se encuentra en una condición límite dentro del modelo. Esta lectura evita clasificar automáticamente como estable cualquier resultado mayor que uno y permite diferenciar entre equilibrio mecánico y cumplimiento de un margen de seguridad de referencia para evaluación geotécnica.

El coeficiente horizontal kh = 0.175 debe interpretarse como un valor referencial de modelamiento y no como un parámetro sísmico específico obtenido mediante un estudio de peligro del punto exacto evaluado. Su adopción se sustentó mediante un criterio simplificado asociado a la acción pseudoestática y se empleó para comparar de forma uniforme las tres secciones. Por ello, los factores de seguridad pseudoestáticos dependen directamente de esta elección y no deben presentarse como una predicción única del comportamiento del talud ante un terremoto determinado. Esta condición coincide con el enfoque general de Hynes-Griffin y Franklin (1984), en el que el coeficiente pseudoestático constituye una representación simplificada de la demanda sísmica, y con trabajos posteriores que muestran la sensibilidad de los resultados frente a la selección del coeficiente horizontal.

La dependencia respecto de kh fue evaluada directamente en el presente estudio mediante el análisis de sensibilidad, evaluando valores desde kh = 0.000 hasta kh = 0.350 con la geometría y los parámetros geotécnicos restantes constantes para cada sección. Esta evaluación permite discutir el efecto del coeficiente horizontal a partir de los propios resultados del modelo, sin asumir que el valor base de 0.175 representa una demanda sísmica única o definitiva para el sitio.

También debe considerarse que el análisis pseudoestático no constituye un análisis dinámico tiempo-historia y no incorpora deformaciones permanentes, respuesta no lineal del suelo ni una caracterización dinámica específica del depósito. Del mismo modo, no se contó con mediciones de presión de poros ni con un estudio hidrogeológico que permita analizar cambios sísmicamente inducidos en las condiciones de agua. En consecuencia, el escenario pseudoestático proporciona una comparación simplificada de la respuesta de las secciones frente a una acción horizontal equivalente, pero no reemplaza una evaluación dinámica detallada ni un estudio de peligro sísmico específico del sitio.

4.7.5. *Influencia de los parámetros geotécnicos en condición estática*

El análisis de sensibilidad permite discutir la influencia de los parámetros geotécnicos con mayor precisión que la comparación directa entre secciones. En este procedimiento se mantuvo constante la geometría y se modificó una sola variable a la vez dentro de un rango de -20 %, -10 %, valor base, +10 % y +20 %. De este modo, el cambio del FS puede asociarse a la modificación local del parámetro analizado sin confundir su efecto con cambios simultáneos en la geometría o en otras propiedades del suelo.

En la cresta, el peso unitario produjo la mayor respuesta del FS dentro del rango evaluado, con valores de FS comprendidos aproximadamente entre 1.252 y 1.591. Este resultado muestra que, para la geometría común de referencia y los parámetros base de esta sección, la variación de γ tuvo una incidencia mayor que las perturbaciones equivalentes aplicadas a c y φ. La interpretación es local: no implica que el peso unitario sea el parámetro más influyente en cualquier talud, sino que fue la variable con mayor respuesta dentro del rango y configuración específicos de la cresta.

En la zona media, el ángulo de fricción interna presentó la mayor respuesta bajo condición estática, con un rango aproximado de FS entre 0.450 y 0.688. Este hallazgo es especialmente relevante porque corrige la interpretación que atribuía el comportamiento crítico principalmente a la cohesión de 0.85 kPa. La baja cohesión sigue siendo una característica desfavorable del estado base, pero, al aislar las variables, φ produjo la mayor variación del FS dentro del rango analizado. Además, aun en los escenarios de sensibilidad más favorables considerados, la zona media permaneció por debajo de la unidad, lo que indica que su condición crítica no depende de una sola perturbación paramétrica sino de la combinación de sus propiedades y geometría de referencia.

En el pie del talud, el ángulo de fricción interna también generó la mayor respuesta estática, con factores de seguridad comprendidos aproximadamente entre 0.992 y 1.295.

El intervalo atraviesa la condición de equilibrio FS = 1.00 y permanece por debajo del valor de referencia estático de 1.50, lo que evidencia un margen reducido aun cuando el parámetro resistente varía favorablemente. Esta sensibilidad resulta coherente con la importancia de la resistencia friccional en materiales granulares y con el elevado peso unitario adoptado para esta sección.

Estos resultados guardan relación general con estudios de análisis paramétrico, como Zeng et al. (2024), y con investigaciones sobre incertidumbre de parámetros geotécnicos, como Garcés Gálvez (2023), en cuanto muestran que cambios controlados en los parámetros de resistencia y peso pueden modificar el FS. No obstante, las metodologías no son equivalentes: en la presente investigación se desarrolló una sensibilidad local de una variable a la vez, mientras que otros trabajos emplean diseños experimentales, análisis probabilísticos o conjuntos de datos más amplios. Por ello, la jerarquía obtenida en esta tesis debe entenderse como una respuesta del modelo dentro de los rangos ensayados y no como una clasificación universal de importancia de c, φ y γ.

La interpretación integrada de ambos niveles de sensibilidad mostró una jerarquización coherente bajo condición estática. El análisis determinístico, mediante la modificación individual de los parámetros, identificó al peso unitario como la variable de mayor respuesta en la cresta y al ángulo de fricción interna como la de mayor respuesta en la zona media y el pie del talud. El análisis estadístico de sensibilidad de las realizaciones Monte Carlo mostró una jerarquización coherente con el análisis determinístico cuando las variables de entrada variaron simultáneamente dentro de los rangos adoptados: en la cresta, γ presentó la mayor contribución proporcional (40.83 %); en la zona media, φ concentró el 94.66 %; y en el pie del talud, φ alcanzó el 51.38 %. Esta coherencia permite sustentar la sensibilidad relativa de los parámetros dentro de cada configuración modelada, sin interpretar dichos resultados como una clasificación universal de importancia ni como inferencia estadística poblacional.

4.7.6. *Influencia paramétrica en condición pseudoestática e implicancias técnicas*

En condición pseudoestática, el análisis determinístico de sensibilidad incorporó, además de c, φ y γ, la variación individual del coeficiente sísmico horizontal kh, manteniendo constantes las demás variables del modelo. Bajo este procedimiento, en la cresta kh produjo la mayor amplitud de respuesta del FS, con valores comprendidos aproximadamente entre 1.016 y 1.393; en la zona media se observó el mismo patrón, con

valores entre 0.325 y 0.560. En el pie del talud, las mayores respuestas determinísticas correspondieron al ángulo de fricción interna y a kh, cuyos valores de ARFS fueron muy próximos (32.30 % y 32.10 %, respectivamente). Estos resultados corresponden al efecto aislado de cada variable dentro de los escenarios controlados de sensibilidad y muestran que el coeficiente sísmico horizontal puede modificar de manera importante la respuesta pseudoestática del modelo, sin que ello implique que sea necesariamente la variable dominante cuando los parámetros varían simultáneamente.

La zona media se mantiene como la sección con la respuesta más desfavorable debido a sus bajos valores de FS en los escenarios analizados incluso cuando se modifica kh, lo que indica que la acción pseudoestática intensifica una condición que ya es crítica bajo carga estática. En la cresta, la reducción causada por el incremento de kh disminuye de forma apreciable el margen disponible, mientras que en el pie la combinación de sensibilidad frente a φ y kh permite que los escenarios evaluados atraviesen la condición FS = 1.00. Desde el punto de vista técnico, esta respuesta sugiere que la zona media requiere la mayor atención en investigaciones posteriores y que el pie del talud merece especial consideración cuando se evalúan escenarios sísmicos, sin que ello equivalga todavía al diseño de una medida de estabilización específica.

La simulación Monte Carlo complementó esta lectura al permitir que c, φ, γ y kh variaran simultáneamente dentro de las distribuciones VosePERT de escenario adoptadas. El análisis estadístico de sensibilidad mostró que, en la cresta, las cuatro variables presentaron magnitudes de sensibilidad semejantes y no se identificó un predominio marcado: las contribuciones proporcionales fueron 26.14 % para γ, 26.06 % para kh, 25.53 % para c y 22.27 % para φ. En la zona media, kh presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = −0.7395 y una contribución proporcional de 57.73 %, seguido de φ con β = 0.6312 y 38.06 %. En el pie del talud, kh también presentó la mayor sensibilidad relativa, con β = −0.7175 y una contribución de 52.17 %, seguido de φ con β = 0.6182 y 35.85 %. Estos resultados muestran que la jerarquía de sensibilidad depende de la sección y del carácter simultáneo de la variación de las entradas, por lo que el resultado determinístico individual y el análisis Monte Carlo deben interpretarse de manera complementaria.

La utilidad del análisis Monte Carlo no se limita a examinar si la tendencia de los resultados determinísticos se mantiene cuando las variables cambian simultáneamente, sino que también permite cuantificar su sensibilidad relativa dentro del modelo. En la

zona media, la concentración de realizaciones con FS < 1.00 es coherente con la condición crítica identificada previamente, mientras que la jerarquización estadística muestra un predominio de kh seguido de φ. En el pie del talud, el aumento de realizaciones por debajo de FS = 1.00 bajo condición pseudoestática se acompaña de una mayor sensibilidad relativa frente a kh y φ. En la cresta, aunque la mayoría de realizaciones permanece por encima de la unidad, la incorporación de la condición pseudoestática reduce el margen general y el análisis estadístico muestra una sensibilidad distribuida entre c, φ, γ y kh. De este modo, Monte Carlo complementa el análisis determinístico y el análisis de sensibilidad individual al incorporar simultáneamente la distribución de la respuesta del FS y la jerarquización relativa de las variables de entrada.

El carácter exploratorio del Monte Carlo resulta especialmente importante debido a la disponibilidad limitada de datos mecánicos. Las distribuciones empleadas no fueron calibradas a partir de una población amplia de ensayos de corte directo por cada unidad geotécnica, sino construidas como distribuciones de escenario alrededor de los valores representativos adoptados. Ejecutar 10 000 iteraciones mejora la estabilidad numérica de la simulación dentro de esas distribuciones, pero no elimina la incertidumbre epistemológica producida por el número reducido de determinaciones de c y φ. Por ello, los resultados de la simulación Monte Carlo deben interpretarse como apoyo complementario a la lectura determinística y no como un índice formal de confiabilidad geotécnica del sector.

En conjunto, los resultados permiten sostener que la variación de los parámetros geotécnicos modifica la respuesta del FS de las secciones representativas y que la incorporación de la condición pseudoestática reduce adicionalmente sus márgenes. La zona media presenta la condición más desfavorable en los análisis determinísticos, de sensibilidad y Monte Carlo; la cresta muestra la mayor estabilidad relativa entre las tres secciones, aunque bajo condición pseudoestática presenta una sensibilidad distribuida entre c, φ, γ y kh; y el pie del talud se mantiene próximo a una condición límite, con predominio relativo de kh seguido de φ en el análisis estadístico de sensibilidad. Esta interpretación corresponde a las configuraciones y rangos modelados y no implica una jerarquía universal de importancia de los parámetros ni una generalización estadística para la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

4.7.7. *Limitaciones estadísticas, probabilísticas y de representatividad*

La interpretación de los resultados de la presente investigación se encuentra

condicionada por limitaciones estadísticas, probabilísticas, espaciales y de modelamiento que deben considerarse al establecer el alcance de los hallazgos. El muestreo empleado fue no probabilístico de tipo intencional y las tres secciones representativas —cresta, zona media y pie del talud— fueron seleccionadas mediante criterios técnicos de representatividad geomorfológica, accesibilidad y diferenciación estratigráfica. En consecuencia, los resultados permiten caracterizar y comparar las secciones evaluadas, pero no constituyen una muestra probabilística que permita realizar inferencias estadísticas sobre la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.

En relación con los parámetros resistentes, se efectuaron nueve corridas instrumentales de corte directo correspondientes a tres muestras representativas, obteniéndose finalmente tres determinaciones independientes de los pares c'–φ', una por cada zona evaluada, posteriormente asignada a la sección representativa correspondiente. Este número de determinaciones permite establecer parámetros representativos para los modelos desarrollados, pero no resulta suficiente para estimar distribuciones poblacionales de cohesión y ángulo de fricción interna, coeficientes de variación empíricos, estructuras de correlación espacial o longitudes de correlación. Por ello, la investigación no desarrolla una caracterización probabilística continua de la variabilidad espacial mediante campos aleatorios ni pretende representar estadísticamente toda la extensión del talud.

El análisis de sensibilidad y la simulación Monte Carlo también presentan un alcance delimitado. Los niveles de variación utilizados en sensibilidad corresponden a perturbaciones paramétricas controladas dentro del modelo numérico y no a mediciones adicionales de variabilidad espacial. De igual forma, las distribuciones VosePERT empleadas en Monte Carlo constituyen distribuciones de escenario acotadas mediante valores mínimo, más probable y máximo, y no distribuciones poblacionales calibradas a partir de una cantidad suficiente de ensayos geotécnicos. En este contexto, la ejecución de 10 000 iteraciones mejora la estabilidad numérica de la simulación dentro de los rangos asumidos, pero no reduce la incertidumbre epistemológica derivada de la limitada información mecánica ni convierte los resultados en probabilidades absolutas de falla.

Adicionalmente, los factores de seguridad de las iteraciones Monte Carlo fueron obtenidos mediante un modelo aproximado de respuesta construido a partir del análisis de sensibilidad y no mediante 10 000 ejecuciones directas de Slide V6.004. La validación complementaria realizada mediante 18 combinaciones de parámetros ejecutadas

directamente en Slide mostró errores relativos entre 0.15 % y 6.50 % en condición estática, con un promedio aproximado de 3.34 %, mientras que en condición pseudoestática los errores se encontraron entre 0.70 % y 36.28 %, con un promedio aproximado de 13.89 %. Las mayores desviaciones se concentraron en las combinaciones pseudoestáticas desfavorables. En consecuencia, el modelo aproximado presenta una mejor correspondencia bajo condición estática y debe interpretarse con mayor cautela en escenarios pseudoestáticos extremos, manteniéndose el Monte Carlo como herramienta complementaria y exploratoria.

Los indicadores de sensibilidad estadística obtenidos a partir de las simulaciones Monte Carlo presentan asimismo un alcance específico. La correlación de rango, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional permiten describir la dirección, magnitud y jerarquía relativa de la respuesta del FS frente a las variables de entrada dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Las 10 000 realizaciones corresponden a combinaciones numéricas generadas por el modelo y no a observaciones geotécnicas independientes del terreno; por tanto, dichos indicadores no constituyen pruebas de significancia poblacional, no permiten inferir distribuciones espaciales reales de los parámetros y no deben interpretarse como evidencia causal o como una jerarquía universal de sensibilidad geotécnica.

Desde el punto de vista de la investigación geotécnica y del modelamiento, las calicatas alcanzaron profundidades aproximadas de 1.00 a 1.50 m y no se realizaron perforaciones profundas, ensayos SPT, estudios geofísicos ni instrumentación piezométrica. Los modelos fueron desarrollados sin superficie freática activa ni presión de poros medida, por lo que esta condición representa únicamente el escenario de modelamiento adoptado y no demuestra ausencia de agua en profundidad. Asimismo, kh = 0.175 corresponde a un coeficiente referencial de modelamiento y el análisis se desarrolló en dos dimensiones. Las superficies críticas obtenidas alcanzaron profundidades superiores a las exploradas directamente, de modo que la continuidad de los parámetros geotécnicos por debajo de la profundidad investigada constituye una simplificación del modelo.

En consecuencia, los resultados de la investigación son representativos de las tres secciones, los parámetros, la geometría común de referencia y los escenarios analizados y no deben extrapolarse automáticamente a toda la extensión de los taludes del barrio La Recoleta. Una caracterización probabilística espacial y una evaluación de confiabilidad

formal requerirían un mayor número de determinaciones mecánicas independientes por zona, exploración geotécnica de mayor profundidad, caracterización de las condiciones hidráulicas y sísmicas específicas del sitio y, cuando corresponda, metodologías capaces de representar explícitamente la variabilidad espacial del terreno.

En términos de aplicación práctica, el aporte de la investigación consiste en identificar diferencias de comportamiento entre las secciones y en mostrar qué parámetros generan mayor respuesta dentro de los rangos evaluados. Esta información proporciona una base técnica para priorizar investigaciones complementarias en la zona media y en el pie del talud, especialmente mediante una exploración más profunda, un mayor número de ensayos mecánicos independientes, medición de las condiciones de agua y una caracterización sísmica específica. Tales estudios permitirían reducir las principales fuentes de incertidumbre antes de formular medidas de estabilización o realizar evaluaciones de diseño con un nivel de detalle superior.

CONCLUSIONES

1. Respecto al primer objetivo específico, se caracterizó la variabilidad geotécnica de las tres secciones representativas mediante los parámetros de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario. En la cresta se obtuvieron valores representativos de $\gamma = 12.78$ kN/m³, $c = 14.64$ kPa y $\varphi = 27.94°$; en la zona media, $\gamma = 15.57$ kN/m³, $c = 0.85$ kPa y $\varphi = 33.36°$; y en el pie del talud, $\gamma = 20.06$ kN/m³, $c = 13.87$ kPa y $\varphi = 30.73°$. La mayor diferencia entre las secciones se observó en la cohesión, debido al valor reducido registrado en la zona media. La integración entre el reconocimiento geotécnico de campo y los ensayos de caracterización permitió diferenciar los materiales presentes en las zonas evaluadas. Sin embargo, los parámetros resistentes fueron obtenidos a partir de una muestra representativa por cada zona evaluada y posteriormente asignados a la sección representativa correspondiente. Por ello, los resultados caracterizan las secciones analizadas y no constituyen una distribución estadística de resistencia para la totalidad de los taludes del barrio La Recoleta.
2. Respecto al segundo objetivo específico, se determinó la estabilidad bidimensional bajo condición estática mediante Slide V6.004 y el método de Spencer, obteniéndose factores de seguridad de FS = 1.393 para la cresta, FS = 0.560 para la zona media y FS = 1.129 para el pie del talud. Ninguna de las tres secciones alcanzó el valor mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia según la Norma Técnica CE.020. La zona media presentó la condición más desfavorable, al obtener un factor de seguridad inferior a FS = 1.00; mientras que la cresta y el pie, aunque presentaron valores superiores a la unidad, permanecieron por debajo del mínimo técnico de referencia.
3. Respecto al tercer objetivo específico, se determinó la estabilidad bidimensional bajo condición pseudoestática considerando kh = 0.175 y kv = 0.00, obteniéndose factores de seguridad de FS = 1.145 para la cresta, FS = 0.423 para la zona media y FS = 1.000 para el pie del talud. En comparación con la condición estática, estos resultados representan reducciones de 17.80 %, 24.46 % y 11.43 %, respectivamente. Los tres valores se encontraron por debajo del FS mínimo sísmico de referencia de 1.25; la zona media permaneció por debajo del equilibrio límite y el pie alcanzó FS = 1.00. Estos resultados corresponden al escenario

pseudoestático evaluado y deben interpretarse considerando que kh = 0.175 fue adoptado como coeficiente referencial de modelamiento.

4. Respecto al cuarto objetivo específico, se determinó que la variación de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario influye de manera diferenciada en el FS bajo condición estática, dentro de las secciones y rangos modelados. El análisis determinístico de sensibilidad mostró que, en la cresta, el peso unitario presentó la mayor amplitud de respuesta, con ΔFS = 0.339 y ARFS = 24.34 %; mientras que en la zona media y el pie del talud predominó el ángulo de fricción interna, con ARFS = 42.50 % y 26.84 %, respectivamente. El análisis estadístico de sensibilidad de 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección mostró una jerarquización coherente con el análisis determinístico bajo variación simultánea de las entradas: en la cresta, γ presentó β estandarizado = −0.6411 y una contribución proporcional de 40.83 %; en la zona media, φ alcanzó β = 0.9817 y 94.66 %; y en el pie, φ obtuvo β = 0.7317 y 51.38 %. Asimismo, c y φ mostraron relaciones directas con el FS, mientras que γ presentó una relación inversa. La coherencia entre ambos niveles de análisis respalda la hipótesis específica 4 dentro de las configuraciones evaluadas, sin que los indicadores Monte Carlo constituyan pruebas de significancia poblacional ni permitan generalizar la jerarquía obtenida a la totalidad de los taludes de La Recoleta.
5. Respecto al quinto objetivo específico, se determinó que la variación de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal influye de manera diferenciada en el FS bajo condición pseudoestática, dentro de las secciones y rangos modelados. El análisis determinístico de sensibilidad mostró que, en la cresta y la zona media, kh presentó la mayor amplitud de respuesta, con ARFS = 32.93 % y 55.56 %, respectivamente; mientras que en el pie del talud el ángulo de fricción interna presentó una amplitud ligeramente mayor, con ARFS = 32.30 %, frente a 32.10 % para kh. Sin embargo, al considerar la variación simultánea de las entradas mediante 10 000 realizaciones Monte Carlo por sección, la cresta presentó una sensibilidad distribuida, sin predominio marcado de una única variable, con contribuciones de 26.14 % para γ, 26.06 % para kh, 25.53 % para c y 22.27 % para φ. En la zona media, kh presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = −0.7395 y una contribución de 57.73 %, seguido de φ con 38.06 %; mientras que en el pie kh alcanzó β = −0.7175 y 52.17 %, seguido de φ con 35.85 %. Asimismo, c y φ

mostraron relaciones directas con el FS, mientras que γ y kh presentaron relaciones inversas. La integración de ambos niveles de análisis respalda la hipótesis específica 5 dentro de las condiciones pseudoestáticas evaluadas, sin que los resultados Monte Carlo constituyan inferencia poblacional ni una jerarquía universal de sensibilidad para la totalidad de los taludes de La Recoleta.

6. Respecto al objetivo general, se determinó que la variabilidad geotécnica influye en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, dentro de las condiciones y rangos modelados. Los análisis determinísticos mostraron factores de seguridad estáticos de 1.393 en la cresta, 0.560 en la zona media y 1.129 en el pie del talud; mientras que bajo condición pseudoestática se obtuvieron valores de 1.145, 0.423 y 1.000, respectivamente, evidenciándose una reducción de la estabilidad al incorporar la acción sísmica. La zona media presentó la condición más desfavorable en ambos escenarios. El análisis de sensibilidad determinístico y el análisis estadístico de sensibilidad de las simulaciones Monte Carlo mostraron que la sensibilidad relativa de los parámetros depende de la sección y de la condición de análisis. Bajo condición estática, γ presentó la mayor sensibilidad relativa en la cresta, mientras que φ predominó en la zona media y el pie; bajo condición pseudoestática, la cresta mostró una sensibilidad distribuida entre c, φ, γ y kh, mientras que en la zona media y el pie predominó kh, seguido principalmente de φ. Asimismo, c y φ mostraron relaciones directas con el FS, mientras que γ y kh presentaron relaciones inversas. En consecuencia, la integración de los resultados experimentales, determinísticos y de sensibilidad respalda la hipótesis general de investigación dentro de las secciones y escenarios evaluados, sin que ello implique inferencia poblacional ni generalización estadística a la totalidad de los taludes de La Recoleta.

RECOMENDACIONES

1. Respecto al primer objetivo específico, se recomienda ampliar en futuras investigaciones la caracterización geotécnica de las tres secciones evaluadas mediante un mayor número de determinaciones independientes de resistencia al corte, incluyendo ensayos adicionales de corte directo y, cuando corresponda, ensayos triaxiales en las diferentes unidades geotécnicas identificadas. Asimismo, se recomienda complementar el mapeo geotécnico superficial con exploraciones que permitan verificar la continuidad espacial y vertical de los materiales. Una base experimental más amplia permitirá estimar con mayor sustento estadístico la media, desviación estándar, coeficiente de variación y distribuciones propias de los parámetros de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario, reduciendo la dependencia de una única determinación mecánica representativa por cada zona evaluada.
2. Respecto al segundo objetivo específico, se recomienda complementar la evaluación de estabilidad estática mediante investigaciones geotécnicas de mayor profundidad, utilizando perforaciones, ensayos SPT y, cuando resulte técnicamente pertinente, métodos geofísicos. Estas exploraciones deberán alcanzar profundidades compatibles con las superficies potenciales de falla identificadas en el modelamiento, principalmente en aquellas secciones donde la profundidad crítica obtenida en Slide excedió la profundidad investigada mediante calicatas. Asimismo, se recomienda incorporar mediciones directas del nivel freático y de presión de poros mediante piezometría, con la finalidad de evaluar escenarios estáticos sustentados en condiciones hidrogeológicas verificadas.
3. Respecto al tercer objetivo específico, se recomienda desarrollar un estudio específico de peligro sísmico para el área de investigación que permita sustentar con mayor precisión el coeficiente sísmico horizontal utilizado en futuros análisis pseudoestáticos. La evaluación deberá considerar las características dinámicas del terreno mediante información obtenida, según disponibilidad y alcance, de ensayos SPT, mediciones de velocidad de onda de corte, métodos geofísicos u otros procedimientos técnicamente aplicables. Esto permitirá reducir la dependencia de un coeficiente pseudoestático referencial y mejorar la representación de las solicitaciones sísmicas del sitio.

4. Respecto al cuarto objetivo específico, se recomienda ampliar en futuras investigaciones la base de datos geotécnica por zona evaluada y unidad de suelo mediante un mayor número de determinaciones independientes de los parámetros resistentes. Esto permitiría calibrar distribuciones probabilísticas propias de c, φ y γ, estimar medidas estadísticas sustentadas en evidencia experimental y fortalecer el análisis de sensibilidad actualmente desarrollado mediante simulación Monte Carlo. Con una base de datos suficiente, podrán incorporarse procedimientos probabilísticos y de confiabilidad de mayor alcance, tales como FOSM o FORM, y contrastar la jerarquía de sensibilidad obtenida en el presente estudio con información geotécnica empírica de mayor representatividad.
5. Respecto al quinto objetivo específico, se recomienda evaluar en futuras investigaciones un conjunto más amplio de escenarios pseudoestáticos mediante valores de kh sustentados en estudios específicos de peligro sísmico del sitio, manteniendo tanto el análisis determinístico individual de c, φ, γ y kh como el análisis estadístico de sensibilidad bajo variación simultánea de las entradas. Asimismo, la simulación Monte Carlo podrá fortalecerse mediante distribuciones probabilísticas calibradas con una mayor cantidad de datos experimentales y mediante una validación más amplia del modelo aproximado de respuesta, especialmente en combinaciones pseudoestáticas desfavorables. Esto permitirá evaluar con mayor robustez la jerarquía relativa de sensibilidad de los parámetros y, cuando exista información suficiente, comparar los resultados con procedimientos formales de confiabilidad, evitando interpretar las simulaciones actuales como probabilidades absolutas de falla del sector.
6. Como recomendación general, se propone priorizar la evaluación geotécnica detallada, el monitoreo y la gestión preventiva de la zona media del talud, debido a que presentó la condición más desfavorable tanto en el análisis estático como pseudoestático. Antes de ejecutar una intervención definitiva, deberá desarrollarse un estudio geotécnico de mayor detalle que permita evaluar alternativas como reperfilado, banquetas, sistemas de drenaje, estructuras de contención o técnicas de refuerzo, verificando su comportamiento mediante modelamiento específico.
7. Asimismo, se recomienda implementar monitoreo topográfico de desplazamientos y fisuras, ampliar la investigación geotécnica antes de extrapolar los resultados a otras zonas del barrio La Recoleta y, en futuros estudios, complementar el modelamiento determinístico con análisis probabilísticos y de

sensibilidad sustentados en una base experimental más amplia, de modo que las distribuciones de entrada y las jerarquías de sensibilidad puedan ser contrastadas con información geotécnica de mayor representatividad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., & Boyce, G. M. (2002). *Slope stability and stabilization methods (2.ª ed.)*. John Wiley & Sons.

Alok, A., Burman, A., Samui, P., Kaloop, M. R., & Eldessouki, M. (2024). A generalized limit equilibrium-based platform incorporating simplified Bishop, Janbu and Morgenstern–Price methods for soil slope stability problems. *Advances in Civil Engineering, 2024*, Article 3053923. https://doi.org/10.1155/2024/3053923

Arias Gonzáles, J. L., & Covinos Gallardo, M. (2021). Diseño y metodología de la investigación. Enfoques Consulting E.I.R.L.

ASTM International. (s. f.-a). ASTM D2216: Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass.

ASTM International. (s. f.-b). ASTM D2434: Standard test method for permeability of granular soils (constant head).

ASTM International. (s. f.-c). ASTM D2487: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).

ASTM International. (s. f.-d). ASTM D3080/D3080M: Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.

ASTM International. (s. f.-e). ASTM D4253: Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table.

ASTM International. (s. f.-f). ASTM D4254: Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density.

ASTM International. (s. f.-g). ASTM D4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils.

ASTM International. (s. f.-h). ASTM D6913/D6913M: Standard test methods for particle-size distribution of soils using sieve analysis.

ASTM International. (s. f.-i). ASTM D854: Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer.

Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Géotechnique, 5*(1), 7–17. https://doi.org/10.1680/geot.1955.5.1.7

Bravo-Zapata, M. F., Muñoz, E., Lapeña-Mañero, P., Montenegro-Cooper, J. M., & King, R. W. (2022). Analysis of the influence of geomechanical parameters and geometry on slope stability in granitic residual soils. *Applied Sciences, 12*(11), 5574. https://doi.org/10.3390/app12115574

Bray, J. D., & Travasarou, T. (2011, enero). *Pseudostatic slope stability procedure* [Ponencia de conferencia]. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chile. https://fl-nzgs-media.s3.amazonaws.com/uploads/2016/07/Bray-2011-Pseudostatic-slope-stability-procedure-paper.pdf

Budhu, M. (2011). *Soil mechanics and foundations (3.ª ed.)*. John Wiley & Sons.

Bustillos Cotrado, J. A. (2024). Análisis bidimensional de estabilidad del talud en una zona de falla geológica en Chinchao, Huánuco, Perú. *Revista Peruana de Ingeniería, Arquitectura y Medio Ambiente, 1*(1), 9–17. https://doi.org/10.37711/repiama.2024.1.1.2

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2025). *2024 disasters in numbers: A hot and stormy year*. EM-DAT – The International Disaster Database, UCLouvain. https://files.emdat.be/reports/2024_EMDAT_report.pdf

Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. (2025). *Escenarios de riesgo por lluvias para el periodo abril–junio del 2025 (con base en el Informe Técnico N.° 04-2025/SENAMHI-DMA-SPC)*. SIGRID. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/18701

Congreso de la República del Perú. (2011). *Ley N.° 29664, Ley que crea el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD)*. https://www.gob.pe/institucion/indeci/informes-publicaciones/1093198-ley-n-29664-y-sus-modificatorias

Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73*, 209–263. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering (9.ª ed.)*. Cengage Learning.

Di Matteo, L., Dragoni, M., Cencetti, C., Ricco, R., & Fucsina, A. (2015). Effects of the natural variability of soil properties on slope stability. Natural Hazards, 79, 1495–1518. https://doi.org/10.1007/s11069-015-1918-y

Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability (2.ª ed.)*. John Wiley & Sons.

Durand Salas, C. G., & Ramos Arias, A. A. (2022). *Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad de taludes en suelos arenosos del sector Lomo de Corvina – Villa El Salvador* [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional de la Universidad Ricardo Palma. https://hdl.handle.net/20.500.14138/5893

Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (2008). *Risk assessment in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons.

Figueroa-Rodríguez, K. A., & Sangerman-Jarquín, D. M. (2022). El método en la ciencia: origen y divergencias según Ruy Pérez Tamayo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 13*(8), 1469–1479. https://doi.org/10.29312/remexca.v13i8.3353

Garcés Gálvez, T. F. (2023). *Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes* [Tesis de pregrado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional de la Universidad de Piura. https://hdl.handle.net/11042/6566

Google Earth. (2026). *Imagen satelital del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, Perú* [Imagen satelital]. Google.

Hammouti, M., El Haim, M., Medini, M., Bensaid, M., Kaddouri, H., & Ahsayen, M. (2026). Transparent Python framework for c-φ reduction slope stability analysis: Implementation and validation. Civil Engineering and Architecture, 14(1), 200–212. https://doi.org/10.13189/cea.2026.140113

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering (3.ª ed.)*. Institution of Mining and Metallurgy.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides, 11*, 167–194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

Hynes-Griffin, M. E., & Franklin, A. G. (1984). *Rationalizing the seismic coefficient method* (Miscellaneous Paper GL-84-13). U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. https://erdc-library.erdc.dren.mil/bitstreams/81b728f8-8b40-4ef8-e053-411ac80adeb3/download

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 14688-1:2017, Geotechnical investigation and testing — Identification and classification of soil — Part 1: Identification and description*. https://www.iso.org/standard/66345.html

Janbu, N. (1973). Slope stability computations. En R. C. Hirschfeld & S. J. Poulos (Eds.), *Embankment-dam engineering* (pp. 47–86). John Wiley & Sons.

Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering Geology, 122*(1–2), 43–50. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.09.017

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall.

Layme Anchapuri, J. F. (2022). *Análisis comparativo de la estabilidad de taludes naturales a través de métodos de equilibrio límite bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas en Caballuni, Juncal-Puno, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/18529

Li, D., Sun, M., Yan, E., & Yang, T. (2021). The effects of seismic coefficient uncertainty on pseudo-static slope stability: A probabilistic sensitivity analysis. *Sustainability, 13*(15), 8647. https://doi.org/10.3390/su13158647

Liu, F., Dong, Z., & Khayatnezhad, M. (2026). Parametric assessment of rainfall-related slope stability through SRM modeling and orthogonal experimental design: Insights from the Zhuquedong slope, China. Scientific Reports, 16, 13091. https://doi.org/10.1038/s41598-026-43289-y

Mendivelso, F. (2022). Prueba no paramétrica de correlación de Spearman. *Revista Médica Sanitas, 24*(1). https://doi.org/10.26852/01234250.578

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). *Norma Técnica CE.020: Estabilización de suelos y taludes del Reglamento Nacional de Edificaciones* (Decreto Supremo N.° 017-2012-VIVIENDA). https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018a). *Norma Técnica E.030: Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones* (Resolución Ministerial N.° 355-2018-VIVIENDA). https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/211900-355-2018-vivienda

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018b). *Norma Técnica E.050: Suelos y Cimentaciones del Reglamento Nacional de Edificaciones* (Resolución Ministerial N.° 406-2018-VIVIENDA). https://www.gob.pe/institucion/vivienda/normas-legales/222983-406-2018-vivienda

Morgenstern, N. R., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Géotechnique, 15*(1), 79–93. https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79

Phoon, K. K., & Ching, J. (Eds.). (2015). *Risk and reliability in geotechnical engineering*. CRC Press.

Phoon, K. K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal, 36*(4), 612–624. https://doi.org/10.1139/t99-038

Rivera Chanca, G. A., & Vicuña Ríos, L. D. (2024). *Análisis probabilístico aplicado a la estabilidad de los taludes de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del Mar* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Perú. https://hdl.handle.net/20.500.12404/26894

Rivera Porras, M. A., & Cueva Sandoval, K. A. (2017). *Inspección geológica de la margen izquierda del río Chili, sector Parque Ecológico. Distrito Alto Selva*

Alegre, provincia Arequipa, región Arequipa (Informe Técnico N.° A6761). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. https://hdl.handle.net/20.500.12544/812

Rocscience Inc. (s. f.). *Slide V6.004* [Software]. Rocscience.

Rotaru, A., Bejan, F., & Almohamad, D. (2022). Sustainable slope stability analysis: A critical study on methods. *Sustainability, 14*(14), 8847. https://doi.org/10.3390/su14148847

Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., Saisana, M., & Tarantola, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons.

Sengani, F., & Allopi, D. (2022). Accuracy of two-dimensional limit equilibrium methods in predicting stability of homogenous road-cut slopes. *Sustainability, 14*(7), 3872. https://doi.org/10.3390/su14073872

Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Géotechnique, 17*(1), 11–26. https://doi.org/10.1680/geot.1967.17.1.11

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice (3.ª ed.)*. John Wiley & Sons.

Vargas Franco, C. L. (2020). Plan de intervención urbano-arquitectónico para la recuperación de la vocación residencial del barrio histórico de la Recoleta - Arequipa [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional de la Universidad Católica de Santa María.

Vela Valdez, J. C., & Soncco Calsina, Y. H. (2018). *Peligros geológicos en zonas de exploración de laderas en la cuenca del valle del río Chili, sector Alto Cayma, Arequipa* (Informe Técnico N.° A6846). Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. https://hdl.handle.net/20.500.12544/1959

Vose Software. (s. f.). *ModelRisk* [Software complementario de Microsoft Excel]. Vose Software.

Wu, C. Z., Wang, Z. Z., Goh, S. H., & Zhang, W. G. (2024). Comparing 2D and 3D slope stability in spatially variable soils using random finite-element method.

Computers and Geotechnics, 170, Article 106324. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106324

Yang, Y., Zhou, W., Jiskani, I. M., Lu, X., Wang, Z., & Luan, B. (2023). Slope stability prediction method based on intelligent optimization and machine learning algorithms. *Sustainability, 15*(2), 1169. https://doi.org/10.3390/su15021169

Yu, H., & Hutson, A. D. (2024). A robust Spearman correlation coefficient permutation test. *Communications in Statistics – Theory and Methods, 53*(6), 2141–2153. https://doi.org/10.1080/03610926.2022.2121144

Yu, L., Bao, Y., Ma, K., Han, Y., Yan, Y., Xu, B., Wang, Z., & Pang, R. (2025). Probabilistic slope stability analysis on marine clay seabed considering spatial variability of soil parameters. *Frontiers in Built Environment, 11*, Article 1545900. https://doi.org/10.3389/fbuil.2025.1545900

Zeng, Y., Zhang, Y., Hu, W., Chen, M., Hu, Q., Liu, X., & Zhu, X. (2024). A case study on soil slope landslide failure and parameter analysis of influencing factors for safety factor based on strength reduction method and orthogonal experimental design. *PLOS ONE, 19*(5), e0300586. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0300586

Zhang, Q., Zhang, H., Wang, L., Li, Q., & Yu, H. (2024). Effect of structural characteristics on the stability of multi-weak rock slopes considering the spatial variability of geotechnical parameters. *Scientific Reports, 14*, Article 30618. https://doi.org/10.1038/s41598-024-82296-9

ANEXOS

ANEXO 1. Matriz de consistencia

Influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026

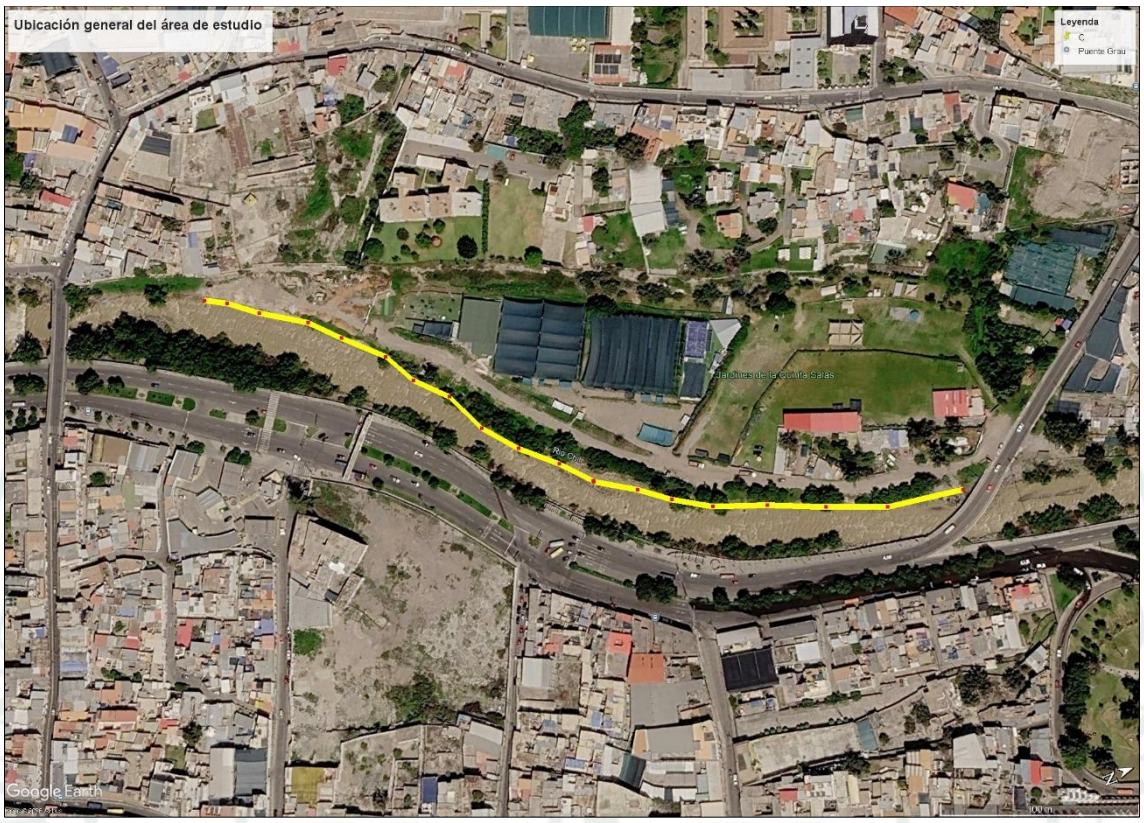
Problemas de investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones e indicadores	Metodología
Problema general: ¿Cuál es la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo general:** Determinar la influencia de la variabilidad geotécnica en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis general:** La variabilidad geotécnica influye en la estabilidad bidimensional estática y pseudoestática de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Variable independiente:** Variabilidad geotécnica. **Variable dependiente:** Estabilidad bidimensional del talud.	**Variable independiente:** variabilidad geotécnica **Dimensión:** Cohesión ✓ **Indicador:** Cohesión c. ✓ **Unidad:** kPa. **Dimensión:** Ángulo de fricción interna. ✓ **Indicador:** Ángulo de fricción interna φ. ✓ **Unidad:** grados. **Dimensión:** Peso unitario ✓ **Indicador:** Peso unitario γ. ✓ **Unidad:** kN/m³. **Variable dependiente:** estabilidad bidimensional del talud	**Enfoque:** Cuantitativo. **Tipo**: Básica. **Nivel:** Explicativo. **Diseño:** No experimental, de corte transversal. **Método:** Hipotético – deductivo. **Población:** Taludes ribereños localizados en el tramo del río Chili correspondiente al barrio La Recoleta, Arequipa. **Muestra:** Tres secciones representativas del talud: cresta, zona media y pie. **Muestreo:** No probabilístico de tipo intencional. **Unidad de análisis:** Cada una de las tres secciones representativas del talud: cresta, zona media y pie.
Problema específico 1: ¿Cómo se caracteriza la variabilidad de los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo específico 1:** Caracterizar la variabilidad de los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis específica 1:** Los parámetros geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario presentan variaciones entre las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.			
Problema específico 2: ¿Cuál es el comportamiento de la estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo específico 2:** Determinar la estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis específica 2:** La estabilidad bidimensional estática de las secciones representativas del talud varía según los parámetros geotécnicos adoptados para la cresta, zona media y pie del talud.			

Problemas de investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones e indicadores	Metodología
Problema específico 3: ¿Cuál es el comportamiento de la estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo específico 3:** Determinar la estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis específica 3:** La estabilidad bidimensional pseudoestática de las secciones representativas del talud presenta reducción de los factores de seguridad respecto a la condición estática, debido a la incorporación del coeficiente sísmico horizontal.		**Dimensión:** Estabilidad estática ✓ **Indicador:** Factor de seguridad estático. ✓ **Unidad:** adimensional. **Dimensión:** Estabilidad pseudoestática ✓ **Indicador:** Factor de seguridad pseudoestático. ✓ **Unidad:** adimensional. **Dimensión:** Evaluación comparativa ✓ **Indicadores:** ❖ Variación absoluta del factor de seguridad ΔFS. ❖ Reducción porcentual del factor de seguridad. ❖ Margen de seguridad FS−1.00. ✓ **Unidades:** adimensional y porcentaje. **Dimensión:** Sensibilidad del factor de seguridad ✓ **Indicador:** Cambio del FS frente a variaciones de c, φ, γ y kh. ✓ **Unidad:** adimensional y porcentaje. **Análisis complementario (no constituye una dimensión de la variable dependiente):** Simulación Monte Carlo y análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada.	**Unidad de observación:** Las nueve calicatas ejecutadas y las muestras de suelo obtenidas durante las exploraciones geotécnicas. **Técnicas:** Observación directa en campo, mapeo geotécnico, exploración mediante calicatas, toma de muestras, ensayos de laboratorio, modelamiento bidimensional, análisis determinístico de sensibilidad y simulación Monte Carlo complementaria, incluyendo el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada. **Instrumentos y herramientas:** Fichas de registro de campo, registro fotográfico, equipos de laboratorio, software Slide V6.004, Microsoft Excel y ModelRisk. **Procesamiento y análisis de datos:** Caracterización y comparación de los parámetros geotécnicos; cálculo de factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos mediante el método de Spencer; comparación de resultados entre cresta, zona media y pie del talud; análisis determinístico de sensibilidad de la cohesión, ángulo de fricción interna, peso unitario y coeficiente sísmico horizontal kh mediante indicadores
Problema específico 4: ¿Cómo influye la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo específico 4:** Determinar cómo influye la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis específica 4:** Las variaciones controladas de la cohesión, del ángulo de fricción interna y del peso unitario influyen en los factores de seguridad obtenidos bajo condición estática, produciendo cambios dentro de los rangos de sensibilidad evaluados.			
Problema específico 5: ¿Cómo influyen la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, así como la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026?	**Objetivo específico 5:** Determinar cómo influyen la variabilidad de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario, así como la variación del coeficiente sísmico horizontal kh, en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática en las secciones representativas de los taludes del barrio La Recoleta, río Chili, Arequipa, 2026.	**Hipótesis específica 5:** Las variaciones controladas de la cohesión, del ángulo de fricción interna, del peso unitario y del coeficiente sísmico horizontal kh influyen en los factores de seguridad obtenidos bajo condición pseudoestática, produciendo cambios dentro de los rangos de sensibilidad evaluados.			

Problemas de investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones e indicadores	Metodología
				✓ **Indicadores de distribución del FS:** ❖ Media del FS. ❖ Desviación estándar y coeficiente de variación. ❖ Percentiles P5 y P95. ❖ Proporción de realizaciones con FS < 1.00 ✓ **Indicadores de sensibilidad estadística** ❖ Correlación de rango entre las variables de entrada y el FS. ❖ Coeficientes beta estandarizados. ❖ Contribución proporcional a la propagación de la respuesta.	de amplitud, tendencia y correlación de rangos de Spearman con alcance descriptivo; y simulación Monte Carlo complementaria con 10 000 realizaciones por escenario, incluyendo el análisis de la distribución del factor de seguridad y la sensibilidad estadística de la respuesta simulada mediante correlación de rango, coeficientes beta estandarizados y contribución proporcional

ANEXO 2. Ubicación del área de estudio y distribución de calicatas

Figura A2-1. Ubicación general del área de estudio



Nota. Imagen referencial obtenida mediante Google Earth. Elaboración propia.

Figura A2-2. Ubicación del talud evaluado en el barrio La Recoleta



Nota. Imagen referencial del sector evaluado. Elaboración propia.

Figura A2-3. Distribución referencial de calicatas en el área de estudio



Nota. La imagen muestra la distribución referencial de las calicatas ejecutadas en tres sectores de exploración ubicados a lo largo de la margen del río Chili. Esta distribución permitió obtener información geotécnica representativa del área evaluada y seleccionar secciones de análisis para el modelamiento bidimensional de estabilidad. Elaboración propia con base en Google Earth. (Círculo rojo calicatas C02, C05, C08 – Círculo azul calicatas C03, C06, C09 – Círculo Amarillo C01, C04, C07)

ANEXO 3. Registro fotográfico de campo

El presente anexo muestra el registro fotográfico de los tres sectores de exploración considerados en el área de estudio, dentro del talud marginal del río Chili, en el barrio La Recoleta. En cada sector se ubicaron tres calicatas en posiciones representativas de la geometría del talud: cresta, zona media y pie, con la finalidad de caracterizar la variabilidad geotécnica del terreno y sustentar el análisis bidimensional de estabilidad.

Figura A3-1. Sector de exploración 1 con ubicación de las calicatas C-01, C-04 y C-07



Nota. En este sector, la calicata C-01 corresponde a la cresta del talud, la calicata C-04 a la zona media y la calicata C-07 al pie del talud. Elaboración propia.

Figura A3-2. Sector de exploración 2 con ubicación de las calicatas C-02, C-05 y C-08



Nota. En este sector, la calicata C-02 corresponde a la cresta del talud, la calicata C-05 a la zona media y la calicata C-08 al pie del talud. Elaboración propia.

Figura A3-3. Sector de exploración 3 con ubicación de las calicatas C-03, C-06 y C-09



Nota. En este sector, la calicata C-03 corresponde a la cresta del talud, la calicata C-06 a la zona media y la calicata C-09 al pie del talud. Elaboración propia.

ANEXO 4. Registro de calicatas y toma de muestras

El presente anexo muestra el registro de calicatas ejecutadas en el área de estudio y la organización de las muestras obtenidas durante la exploración geotécnica. Las calicatas fueron distribuidas en tres sectores de exploración ubicados a lo largo de la margen del río Chili, considerando posiciones representativas de la geometría del talud: cresta, zona media y pie.

Esta distribución permitió obtener información geotécnica representativa del área evaluada, identificar la variación de los materiales presentes en el talud y seleccionar muestras para los ensayos de laboratorio empleados en la caracterización física, clasificación SUCS, parámetros de resistencia y modelamiento bidimensional de estabilidad.

Tabla A4-1.

Resumen de calicatas ejecutadas y muestras obtenidas

Sector de exploración	Color referencial	Calicata	Posición geomorfológica del talud	Profundidad máxima (m)	N.º de muestras
Sector 1	Amarillo	C-01	Cresta	1.50	3
Sector 1	Amarillo	C-04	Zona media	1.50	3
Sector 1	Amarillo	C-07	Pie	1.00	2
Sector 2	Rojo	C-02	Cresta	1.50	3
Sector 2	Rojo	C-05	Zona media	1.50	3
Sector 2	Rojo	C-08	Pie	1.00	2
Sector 3	Azul	C-03	Cresta	1.50	3
Sector 3	Azul	C-06	Zona media	1.50	3
Sector 3	Azul	C-09	Pie	1.00	2
Total					**24**

Nota. Las calicatas fueron distribuidas en tres sectores de exploración representativos del área de estudio. En cada sector se consideraron posiciones asociadas a la cresta, zona media y pie del talud. Las calicatas C-01 a C-06 alcanzaron una profundidad máxima de 1.50 m, mientras que las calicatas C-07 a C-09 alcanzaron 1.00 m debido a la presencia de material grueso, cantos y bloques hacia el pie del talud.

1. PROCESO DE EXCAVACIÓN DE CALICATAS EN POSICIÓN DE CRESTA

1.1. Calicata C-01

1.1.1. Datos generales de la calicata

Código	C-01	**Zona**	Cresta (parte superior del talud)
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228773.41 m
Norte (N)	8185784.55 m	**Dimensiones**	1.00 m × 1.00 m
Profundidad máxima	1.50 m	**Tipo de excavación**	Manual
Herramientas	Pico, pala, barreta, escuadra, badilejo y cinta métrica	**Muestreo**	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m

1.1.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Ubicación e identificación de la Calicata C-01; presentación de herramientas y condición inicial del terreno.



Fotografía 2. Trazo y delimitación superficial de la calicata con dimensiones de 1.00 m × 1.00 m.



Fotografía 3. Inicio de la excavación manual mediante el uso de pico, pala y barreta.



Fotografía 4. Control de avance y verificación de la profundidad de 0.50 m.

	
Fotografía 5. Vista del perfil expuesto y medición de la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 6. Control de excavación y verificación de la profundidad final de 1.50 m.
	
Fotografía 7. Extracción de muestra representativa correspondiente a la profundidad de 0.50 m.	Fotografía 8. Colocación, embolsado y rotulado de la muestra obtenida a 0.50 m.
	
Fotografía 9. Extracción de muestra representativa correspondiente a la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 10. Colocación, embolsado y rotulado de la muestra obtenida a 1.00 m.

	
Fotografía 11. Extracción de muestra representativa correspondiente a la profundidad de 1.50 m.	Fotografía 12. Embolsado, rotulado y organización final de las muestras para su traslado y ensayo.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-01.

1.2. CALICATA C-02

1.2.1. Datos generales

Código	C-02	Zona	Cresta (parte superior del talud)
Coordenadas UTM	Zona 19 K	Este (E)	228617.29 m
Norte (N)	8185565.09 m	Dimensiones	No consignadas en el registro
Profundidad máxima	1.50 m	Tipo de excavación	Manual
Herramientas	Pala, pico/barreta, cinta métrica, recipiente, bolsas y marcador	Muestreo	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m

1.2.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Ubicación e identificación de la Calicata C-02 en la zona de cresta y control de la excavación a 0.50 m.



Fotografía 2. Verificación de la profundidad de 0.50 m mediante cinta métrica y exposición del perfil superficial.



Fotografía 3. Extracción manual de la muestra representativa correspondiente al nivel de 0.50 m.



Fotografía 4. Colocación, embolsado y preparación de la muestra obtenida a 0.50 m.

	
Fotografía 5. Vista del estrato superficial de 0.00 a 0.50 m, constituido por relleno granular heterogéneo con gravas y bolones.	Fotografía 6. Control de avance y verificación de la profundidad de 1.00 m en la Calicata C-02.
	 
Fotografía 7. Extracción de muestra representativa del estrato comprendido entre 0.50 y 1.00 m.	Fotografía 8. Embolsado y acondicionamiento de la muestra obtenida al nivel de 1.00 m.
	
Fotografía 9. Medición y control de laprofundidad final de 1.50 m, con observación del perfil expuesto.	Fotografía 10. Extracción de la muestra representativa correspondiente al nivel de 1.50 m.

	
Fotografía 11. Rotulado de la bolsa de muestra con el código de calicata, zona y profundidad.	Fotografía 12. Vista del material del estrato inferior, correspondiente a arena limosa fina con pocas gravas dispersas.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-02.

1.1. CALICATA C-03

1.1.1. Datos generales

Código	C-03	**Zona**	Cresta
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228744.00 m
Norte (N)	8185698.00 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.50 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m	**Condición relevante**	Presencia de raíces, cantos y bloques de gran tamaño

1.1.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Ubicación, identificación y trazo inicial de la Calicata C-03 en la zona de cresta.



Fotografía 2. Control del avance de excavación y verificación de la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 3. Extracción de la muestra representativa correspondiente al nivel de 0.50 m.



Fotografía 4. Colocación del material en bolsa y preparación para el rotulado de l muestra de 0.50 m.

	
Fotografía 5. Embolsado y rotulado de la muestra obtenida en el estrato superficial.	Fotografía 6. Vista del perfil y control de la excavación hasta la profundidad de 1.00 m.
	
Fotografía 7. Observación del estrato de 0.50 a 1.00 m con gravas, cantos y bloques grandes.	Fotografía 8. Extracción de material de la matriz arenolimosa para la muestra correspondiente a 1.00 m.
	
Fotografía 9. Verificación de la profundidad final de 1.50 m y reconocimiento del fondo de la calicata.	Fotografía 10. Excavación parcial entre cantos y bloques debido a la elevada compacidad del relleno.

	
Fotografía 11. Obtención de muestra disturbada de la matriz fina ubicada entre los bloques a 1.50 m.	Fotografía 12. Embolsado, identificación y organización final de la muestra obtenida en la base.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-03.

2. PROCESO DE EXCAVACIÓN DE CALICATAS EN ZONA MEDIA

2.1. Calicata C-04

2.1.1. Datos generales de la calicata

3. **Código**	C-04	**Zona**	Media del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228775.44 m
Norte (N)	8185782.46 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.50 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m	**Condición relevante**	Depósito arenolimoso natural, homogéneo y sin bloques

2.1.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Vista del perfil expuesto e identificación de la Calicata C-04 a la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 2. Extracción de la muestra representativa correspondiente al estrato de 0.00 a 0.50 m.



Fotografía 3. Colocación y embolsado de la muestra obtenida a la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 4. Muestra rotulada y registro del material arenolimoso extraído a 0.50 m.

	
Fotografía 5. Control de la excavación y medición del perfil hasta la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 6. Extracción del material representativo correspondiente al nivel de 1.00 m.
	
Fotografía 7. Embolsado de la muestra arenolimosa obtenida en el intervalo de 0.50 a 1.00 m.	Fotografía 8. Muestra identificada y vista del perfil homogéneo de la calicata a 1.00 m.
	
Fotografía 9. Verificación de la profundidad final de 1.50 m mediante cinta métrica.	Fotografía 10. Extracción manual de la muestra representativa correspondiente al nivel de 1.50 m.

	
Fotografía 11. Colocación y embolsado del material obtenido en la base de la calicata.	Fotografía 12. Muestra rotulada y registro final del perfil arenolimoso a 1.50 m.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-04.

2.2. Calicata C-05

2.2.1. Datos generales de la calicata

2. Código	C-05	**Zona**	Media del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228619.00 m
Norte (N)	8185562.00 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.50 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m	**Condición relevante**	Suelo fino limo-arcilloso / limo-arenoso, húmedo y cohesivo

2.2.2. Registro fotográfico del procedimiento

	
Fotografía 1. Identificación de la Calicata C-05 y verificación de la profundidad de 0.50 m en la zona media del talud.	Fotografía 2. Extracción manual de la muestra representativa correspondiente al intervalo de 0.00 a 0.50 m.
	
Fotografía 3. Colocación del material fino en el recipiente y preparación para su embolsado a 0.50 m.	Fotografía 4. Embolsado y rotulado de la muestra obtenida a la profundidad de 0.50 m.

	
Fotografía 5. Control de la excavación y medición del perfil hasta alcanzar la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 6. Extracción de la muestra representativa correspondiente al intervalo de 0.50 a 1.00 m.
	
Fotografía 7. Colocación y embolsado del material limo-arenoso obtenido a la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 8. Muestra identificada y registro del perfil de suelo fino observado a 1.00 m.
	
Fotografía 9. Verificación de la profundidad final de 1.50 m mediante cinta métrica.	Fotografía 10. Extracción manual del material representativo correspondiente al intervalo de 1.00 a 1.50 m.

	
Fotografía 11. Embolsado y rotulado de la muestra limo-arcillosa obtenida en la base de la calicata.	

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-05.

2.3. Calicata C-06

2.3.1. Datos generales de la calicata

3. Código	C-06	**Zona**	Media del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228745.00 m
Norte (N)	8185696.00 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.50 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m, 1.00 m y 1.50 m	**Condición relevante**	Suelo fino limo-arenoso continuo, sin bloques ni escombros

2.3.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Vista del perfil expuesto e identificación de la Calicata C-06 a la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 2. Extracción manual de la muestra correspondiente al estrato de 0.00 a 0.50 m.



Fotografía 3. Colocación y embolsado de la muestra obtenida a la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 4. Control de la excavación y medición del perfil hasta la profundidad de 1.00 m.

	
Fotografía 5. Extracción de la muestra representativa correspondiente al intervalo de 0.50 a 1.00 m.	Fotografía 6. Rotulado de la muestra obtenida a 1.00 m y verificación de su correspondencia con el nivel de muestreo.
	
Fotografía 7. Verificación de la profundidad final de 1.50 m mediante cinta métrica.	Fotografía 8. Extracción de la muestra representativa correspondiente al estrato de 1.00 a 1.50 m.
	
Fotografía 9. Colocación y embolsado del material obtenido en la base de la calicata.	Fotografía 10. Rotulado y organización final de la muestra de 1.50 m para su traslado y ensayo.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-06.

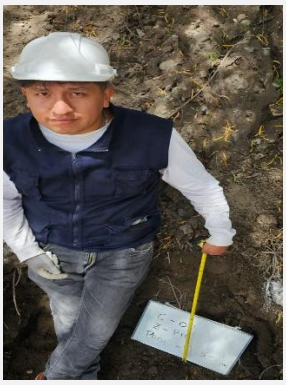
3. PROCESO DE EXCAVACIÓN DE CALICATAS EN PIE DEL TALUD

3.1. Calicata C-07

3.3.1. Datos generales de la calicata

Código	C-07	**Zona**	Pie del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228777.05 m
Norte (N)	8185781.49 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.00 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m y 1.00 m	**Condición relevante**	Suelo fino limo-arenoso con humedad media a relativamente alta

3.3.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Verificación de la profundidad de 0.50 m e identificación de la Calicata C-07 en la zona pie del talud.



Fotografía 2. Extracción manual de la muestra correspondiente al estrato de 0.00 a 0.50 m.



Fotografía 3. Recolección del material representativo mediante recipiente limpio en el nivel de 0.50 m.



Fotografía 4. Colocación y embolsado de la muestra obtenida a la profundidad de 0.50 m.

	
Fotografía 5. Muestra rotulada y registro del perfil correspondiente al primer estrato.	Fotografía 6. Control de la excavación y medición de la profundidad final de 1.00 m.
	
Fotografía 7. Muestra identificada del estrato comprendido entre 0.50 y 1.00 m.	Fotografía 8. Extracción del material representativo correspondiente a la profundidad de 1.00 m.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-07.

3.2. Calicata C-08

3.2.1. Datos generales de la calicata

Código	C-08	**Zona**	Pie del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228621.00 m
Norte (N)	8185560.00 m	**Dimensiones**	1.00 m x 1.00 m
Profundidad máxima	1.00 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m y 1.00 m	**Condición relevante**	Depósito arenolimoso fino, probablemente de origen aluvial

3.2.2. Registro fotográfico del procedimiento

 **1**	
Fotografía 1. Ubicación, identificación y delimitación inicial de la Calicata C-08 en la zona pie del talud.	Fotografía 2. Extracción de la muestra representativa correspondiente al intervalo de 0.00 a 0.50 m.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-08.

3.3. Calicata C-09

3.3.1. Datos generales de la calicata

4. Código	C-09	**Zona**	Pie del talud
Coordenadas UTM	Zona 19 K	**Este (E)**	228746.00 m
Norte (N)	8185695.00 m	**Dimensiones**	1.00 x 1.00
Profundidad máxima	1.00 m	**Tipo de excavación**	Manual
Muestreo	0.50 m y 1.00 m	**Condición relevante**	Suelo fino limo-arcilloso, húmedo y con materia orgánica dispersa

3.3.2. Registro fotográfico del procedimiento



Fotografía 1. Vista del perfil expuesto e identificación de la Calicata C-09 en la zona pie del talud, a la profundidad de 0.50 m.



Fotografía 2. Verificación visual del primer estrato y del cambio de tonalidad hacia la base del intervalo de 0.00 a 0.50 m.



Fotografía 3. Extracción manual de la muestra representativa correspondiente al nivel de 0.50 m.



Fotografía 4. Muestra embolsada y rotulada del primer estrato de la Calicata C-09.

	
Fotografía 5. Control de la excavación y medición de la profundidad final de 1.00 m.	Fotografía 6. Extracción del material representativo correspondiente al intervalo de 0.50 a 1.00 m.
	
Fotografía 7. Colocación y embolsado de la muestra obtenida a la profundidad de 1.00 m.	Fotografía 8. Muestra rotulada y registro final del segundo estrato de la Calicata C-09.

Nota. Elaboración propia con base en el registro de campo de la Calicata C-09.

ANEXO 5. Resultados de ensayos de laboratorio

El presente anexo muestra los resultados complementarios de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas durante la exploración geotécnica del área de estudio. Estos ensayos permitieron determinar las propiedades físicas, de clasificación y de comportamiento hidráulico de los suelos, las cuales fueron empleadas para la caracterización geotécnica y el análisis de estabilidad bidimensional.

Los resultados de laboratorio incluyen el contenido de humedad, límites de Atterberg, granulometría, clasificación SUCS, gravedad específica, densidad máxima y mínima, y permeabilidad. Estos parámetros permitieron identificar la variabilidad geotécnica entre las posiciones representativas del talud: cresta, zona media y pie.

Nota. Los cálculos detallados de los ensayos de laboratorio fueron desarrollados en hojas de cálculo y se conservan como respaldo digital de la investigación. En el presente anexo se presentan los resultados consolidados empleados para la caracterización geotécnica del suelo.

A5.1. Contenido de humedad

Ficha A5-1. Cálculo del contenido de humedad de las muestras evaluadas

N°	Calicata	Zona	Prof (m)	Código muestra	Código capsula	W1 (g)	W2 (g)	W3 (g)	Wh (g) -Peso Húmedo	Ws (g) - Peso Seco	w (%)
1	C01	Cresta	0.5	C01-0.50	H - 01	485.00	1504.00	1365.00	1019.00	880.00	15.80%
2	C01	Cresta	1	C01-1.00	H - 02	371.00	1485.00	1310.00	1114.00	939.00	18.64%
3	C01	Cresta	1.5	C01-1.50	H - 03	485.50	1552.00	1455.00	1066.50	969.50	10.01%
4	C02	Cresta	0.5	C02-0.50	H - 04	371.00	1438.00	1300.00	1067.00	929.00	14.85%
5	C02	Cresta	1	C02-1.00	H - 05	486.50	1510.50	1460.00	1024.00	973.50	5.19%
6	C02	Cresta	1.5	C02-1.50	H - 06	339.00	1442.00	1335.00	1103.00	996.00	10.74%
7	C03	Cresta	0.5	C03-0.50	H - 07	490.00	1588.00	1390.00	1098.00	900.00	22.00%
8	C03	Cresta	1	C03-1.00	H - 08	374.00	1430.00	1340.00	1056.00	966.00	9.32%
9	C03	Cresta	1.5	C03-1.50	H - 09	437.00	1495.00	1445.00	1058.00	1008.00	4.96%

10	C04	Media	0.5	C04-0.50	H - 10	439.00	1528.00	1400.00	1089.00	961.00	13.32%
11	C04	Media	1	C04-1.00	H - 11	340.00	1504.00	1325.00	1164.00	985.00	18.17%
12	C04	Media	1.5	C04-1.50	H - 12	455.50	1644.00	1490.00	1188.50	1034.50	14.89%
13	C05	Media	0.5	C05-0.50	H - 13	338.50	1668.00	1415.00	1329.50	1076.50	23.50%
14	C05	Media	1	C05-1.00	H - 14	489.50	1608.00	1410.00	1118.50	920.50	21.51%
15	C05	Media	1.5	C05-1.50	H - 15	372.50	1469.00	1270.00	1096.50	897.50	22.17%
16	C06	Media	0.5	C06-0.50	H - 16	436.50	1590.50	1420.00	1154.00	983.50	17.34%
17	C06	Media	1	C06-1.00	H - 17	448.00	1510.00	1345.00	1062.00	897.00	18.39%
18	C06	Media	1.5	C06-1.50	H - 18	370.50	1524.00	1335.00	1153.50	964.50	19.60%
19	C07	Pie	0.5	C07-0.50	H - 19	371.00	1476.00	1290.00	1105.00	919.00	20.24%
20	C07	Pie	1	C07-1.00	H - 20	490.00	1508.00	1330.00	1018.00	840.00	21.19%

21	C08	Pie	0.5	C08-0.50	H - 21	338.00	1339.00	1175.00	1001.00	837.00	19.59%
22	C08	Pie	1	C08-1.00	H - 22	434.00	1440.00	1215.00	1006.00	781.00	28.81%
23	C09	Pie	0.5	C09-0.50	H - 23	336.50	1440.00	1225.00	1103.50	888.50	24.20%
24	C09	Pie	1	C09-1.00	H - 24	373.50	1550.00	1345.00	1176.50	971.50	21.10%

Nota. Las fichas muestran el procedimiento de cálculo empleado para determinar el contenido de humedad de las muestras analizadas.

A5.2. Límites de Atterberg

Ficha A5-2. Cálculos de límites de Atterberg

Cálculo de límite líquido de zona Cresta – (Representativa)

Muestra (código): H - 01

Calicata: 1

Profundidad: 0.5

Fecha: 3/12/2025

SECCIÓN A – LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Punto	Nº de golpes (N)	Código cápsula de humedad
1	16	H - 01, 1 LL
2	25	H - 01, 2 LL
3	35	H - 01, 3 LL

.2 SECCIÓN A2 – LÍMITE LÍQUIDO – CÁLCULO DE HUMEDAD

Porcentaje de Humedad

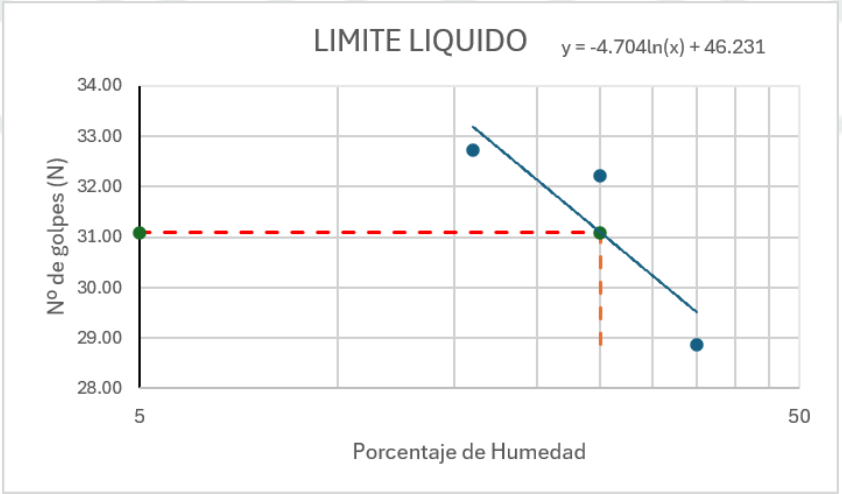
Código cápsula	W_1 (g) Cápsula vacía	W_2 (g) Cápsula + suelo húmedo	W_3 (g) Cápsula + suelo seco	w (%) = $(W_2 - W_3) / (W_3 - W_1) \times 100$
H - 18, 1 LL	14.26	32.76	28.20	32.71
H - 18, 2 LL	14.37	41.63	34.99	32.20
H - 18, 3 LL	14.26	34.97	30.33	28.87

USANDO LOS DATOS DE LA ECUACION LOGARITMICA

Y=	-4.704 ln(25) + 46.231

LIMITE LIQUIDO

Y / LL =	31.09	%



Cálculo de límite líquido de zona Medio – (Representativa)

Muestra (código): H -13
Calicata: 5
Profundidad: 0.5
Fecha: 3/12/2025

SECCIÓN A – LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Punto	Nº de golpes (N)	Código cápsula de humedad
1	15	H -13, 1 LL
2	28	H -13, 2 LL
3	43	H -13, 3 LL

.2 SECCIÓN A2 – LÍMITE LÍQUIDO – CÁLCULO DE HUMEDAD

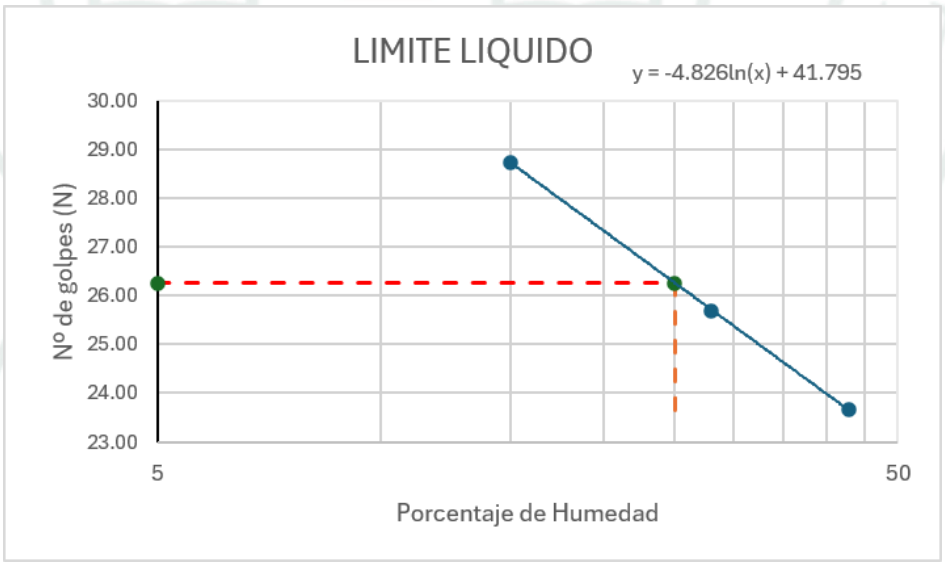
Porcentaje de Humedad

Código cápsula	W_1 (g) Cápsula vacía	W_2 (g) Cápsula + suelo húmedo	W_3 (g) Cápsula + suelo seco	w (%) = ($W_2 - W_3$) / ($W_3 - W_1$) × 100
H - 18, 1 LL	14.47	33.78	29.47	28.73
H - 18, 2 LL	14.12	41.81	36.15	25.69
H - 18, 3 LL	14.39	37.13	32.78	23.65

USANDO LOS DATOS DE LA ECUACION LOGARITMICA

Y= -4.826 ln(25) + 41.795

Y / LL =	26.26	%



Cálculo de límite líquido de zona Pie – (Representativa)

Muestra (código): H - 22

Calicata: 8

Profundidad: 1

Fecha: 3/12/2025

SECCIÓN A – LÍMITE LÍQUIDO (LL)

Punto	Nº de golpes (N)	Código cápsula de humedad
1	17	H - 22, 1 LL
2	28	H - 22, 2 LL
3	36	H - 22, 3 LL

.2 SECCIÓN A2 – LÍMITE LÍQUIDO – CÁLCULO DE HUMEDAD

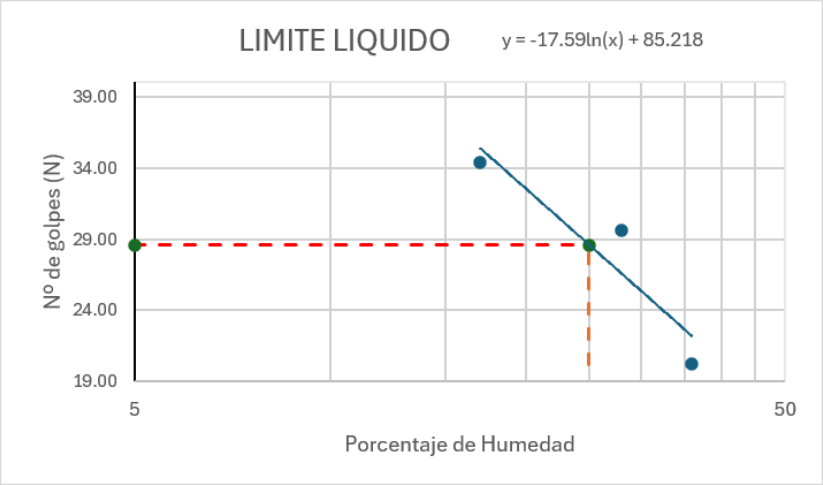
Porcentaje de Humedad

Código cápsula	W_1 (g) Cápsula vacía	W_2 (g) Cápsula + suelo húmedo	W_3 (g) Cápsula + suelo seco	w (%) = ($W_2 - W_3$) / ($W_3 - W_1$) × 100
H - 18, 1 LL	14.16	39.95	33.35	34.39
H - 18, 2 LL	12.59	31.91	27.50	29.58
H - 18, 3 LL	12.65	31.50	28.33	20.22

USANDO LOS DATOS DE LA ECUACION LOGARITMICA

Y=	-17.59 ln(25) + 85.218

Y / LL =	28.60	%



Nota. Los límites de Atterberg permitieron evaluar el comportamiento plástico de los finos presentes en las muestras analizadas.

Se determinó el LL por Casagrande como la humedad correspondiente a 25 golpes. En cambio, el LP resultó NP porque el material no permitió conformar el hilo de 3.2 mm; se desintegró durante el rolado, lo cual indica baja o nula plasticidad (predominio limoso/arenoso y poca fracción arcillosa). Por ello se reporta LP = NP e IP = NP.

A5.3. Análisis granulométrico

Ficha A5-3. *Cálculo y Resultados del análisis granulométrico por tamizado*

MUESTRA	ZONA	CALICATA	PROFUNDIDAD	PESO INICIAL (G)	PESO FINAL (G)	% ERROR	% PASA #4	% PASA #200	% GRAVA	%ARENA	%FINOS	D10 mm	D30 mm	D60 mm	Coef. De Unif. (Cu)	Coef. De Curv. (Cc)
H - 01	CRESTA	1	0.5	878.93	876.91	0.23%	98.25	18.10	0.69	81.21	18.10	No aplica	0.1041	1.0540	No aplica	No aplica
H - 02	CRESTA	1	1.00	939.62	936.33	0.35%	86.47	7.78	4.74	87.48	7.78	0.0856	0.2265	0.8488	9.9147	0.7062
H - 03	CRESTA	1	1.50	966.25	964.40	0.19%	73.46	10.57	14.75	74.68	10.57	No aplica	0.2847	1.9415	No aplica	No aplica
H - 04	CRESTA	2	0.50	929.61	928.06	0.17%	93.10	5.06	3.54	91.40	5.06	0.1012	0.2198	0.5518	5.4545	0.8652
H - 05	CRESTA	2	1.00	973.15	970.72	0.25%	70.44	11.18	19.56	69.25	11.18	0.0750	0.2573	2.1248	28.3198	0.4153
H - 06	CRESTA	2	1.50	993.72	991.57	0.22%	89.25	9.53	3.91	86.56	9.53	0.0764	0.1648	0.5305	6.9442	0.6705
H - 07	CRESTA	3	0.50	899.18	897.37	0.20%	86.36	6.24	6.29	87.47	6.24	0.1001	0.3067	1.0201	10.1877	0.9207
H - 08	CRESTA	3	1.00	962.56	961.70	0.09%	78.52	9.17	13.78	77.05	9.17	0.0782	0.2106	1.0581	13.5270	0.5358
H - 09	CRESTA	3	1.50	1004.51	1003.03	0.15%	75.26	4.41	15.08	80.51	4.41	0.1367	0.4602	1.8183	13.3026	0.8522
H - 10	MEDIO	4	0.50	960.23	958.11	0.22%	98.94	15.65	0.14	84.21	15.65	No aplica	0.1071	0.2458	No aplica	No aplica
H - 11	MEDIO	4	1.00	983.79	981.37	0.25%	98.58	21.38	0.58	78.04	21.38	No aplica	0.0945	0.2296	No aplica	No aplica
H - 12	MEDIO	4	1.50	1034.3	1031.90	0.23%	92.94	6.72	2.79	90.48	6.72	0.0863	0.1859	0.4867	5.6387	0.8223

H - 13	MEDIO	5	0.50	1074.22	1071.15	0.29%	81.30	7.65	7.42	84.94	7.65	0.0843	0.2086	1.0055	11.9205	0.5128
H - 14	MEDIO	5	1.00	920.55	919.12	0.16%	96.43	12.65	1.90	85.45	12.65	No aplica	0.1249	0.3219	No aplica	No aplica
H - 15	MEDIO	5	1.50	897.01	895.43	0.18%	97.67	12.93	0.73	86.34	12.93	No aplica	0.1196	0.2970	No aplica	No aplica
H - 16	MEDIO	6	0.50	942.35	939.68	0.28%	85.24	6.02	7.88	86.10	6.02	0.0961	0.2458	0.7947	8.2740	0.7913
H - 17	MEDIO	6	1.00	791.28	790.15	0.14%	88.72	6.64	4.26	89.10	6.64	0.0906	0.2311	0.7401	8.1645	0.7962
H - 18	MEDIO	6	1.50	931.57	928.62	0.32%	88.11	7.23	4.04	88.73	7.23	0.0902	0.2436	0.8142	9.0296	0.8084
H - 19	PIE	7	0.50	802.3	801.15	0.14%	83.10	5.91	9.04	85.05	5.91	0.0967	0.2521	0.8772	9.0702	0.7488
H - 20	PIE	7	1.00	776.79	774.08	0.35%	88.03	11.42	4.83	83.75	11.42	No aplica	0.1645	0.4893	No aplica	No aplica
H - 21	PIE	8	0.50	791.7	788.18	0.44%	89.99	8.63	2.31	89.06	8.63	0.0800	0.1888	0.5885	7.3604	0.7578
H - 22	PIE	8	1.00	778.2	776.63	0.20%	94.11	13.93	2.53	83.55	13.93	No aplica	0.1238	0.3329	No aplica	No aplica
H - 23	PIE	9	0.50	885	883.22	0.20%	67.75	1.29	17.61	81.10	1.29	0.2425	1.4947	3.3378	13.7636	2.7599
H - 24	PIE	9	1.00	970.42	967.94	0.26%	91.16	11.29	1.63	87.07	11.29	No aplica	0.1670	0.5495	No aplica	No aplica

Nota. El análisis granulométrico permitió determinar la distribución de tamaños de partículas y la predominancia de materiales granulares en las muestras evaluadas.

Figura A5-1. Curva granulométrica representativa de la cresta del talud

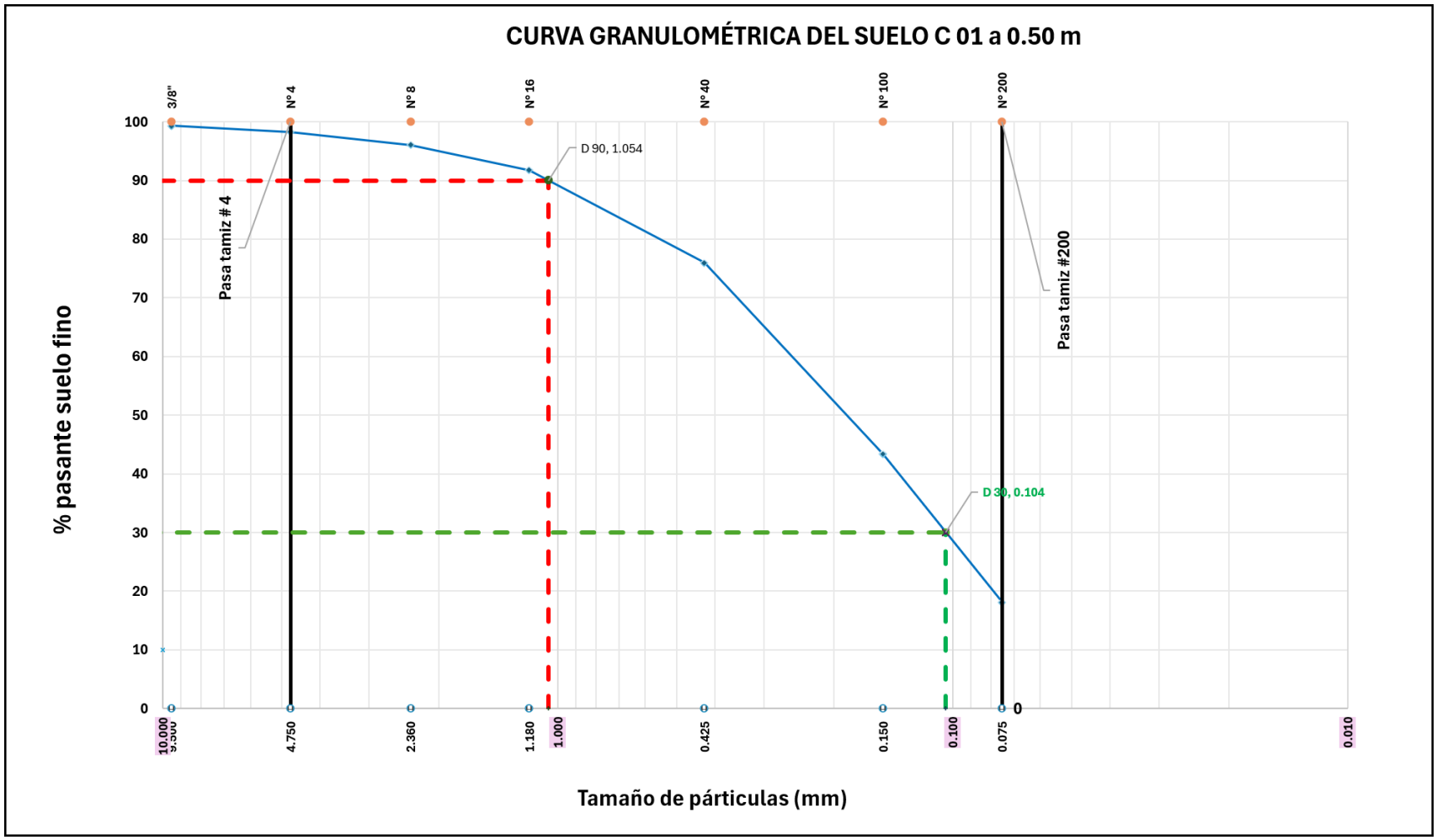


Figura A5-2. Curva granulométrica representativa de la zona media del talud

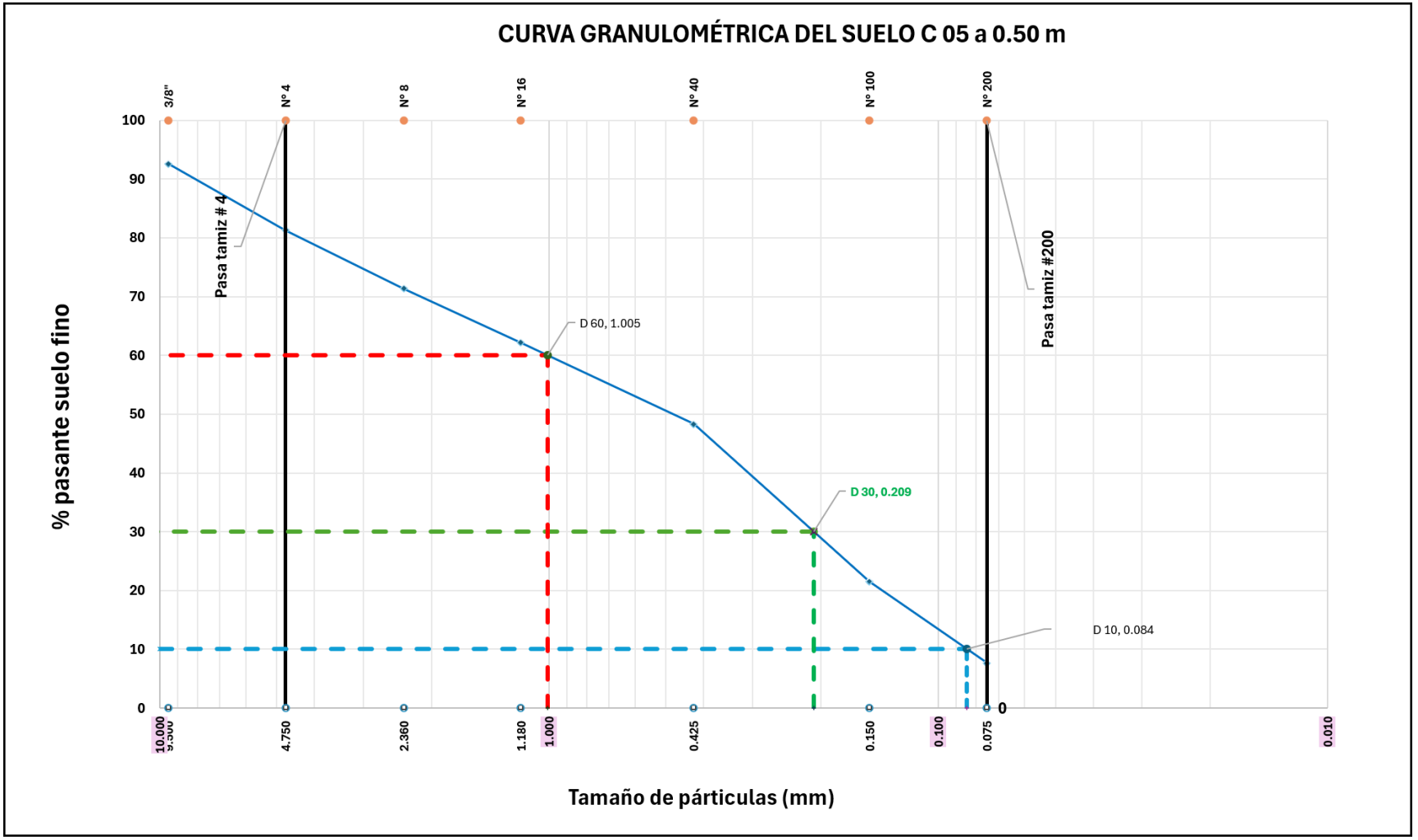
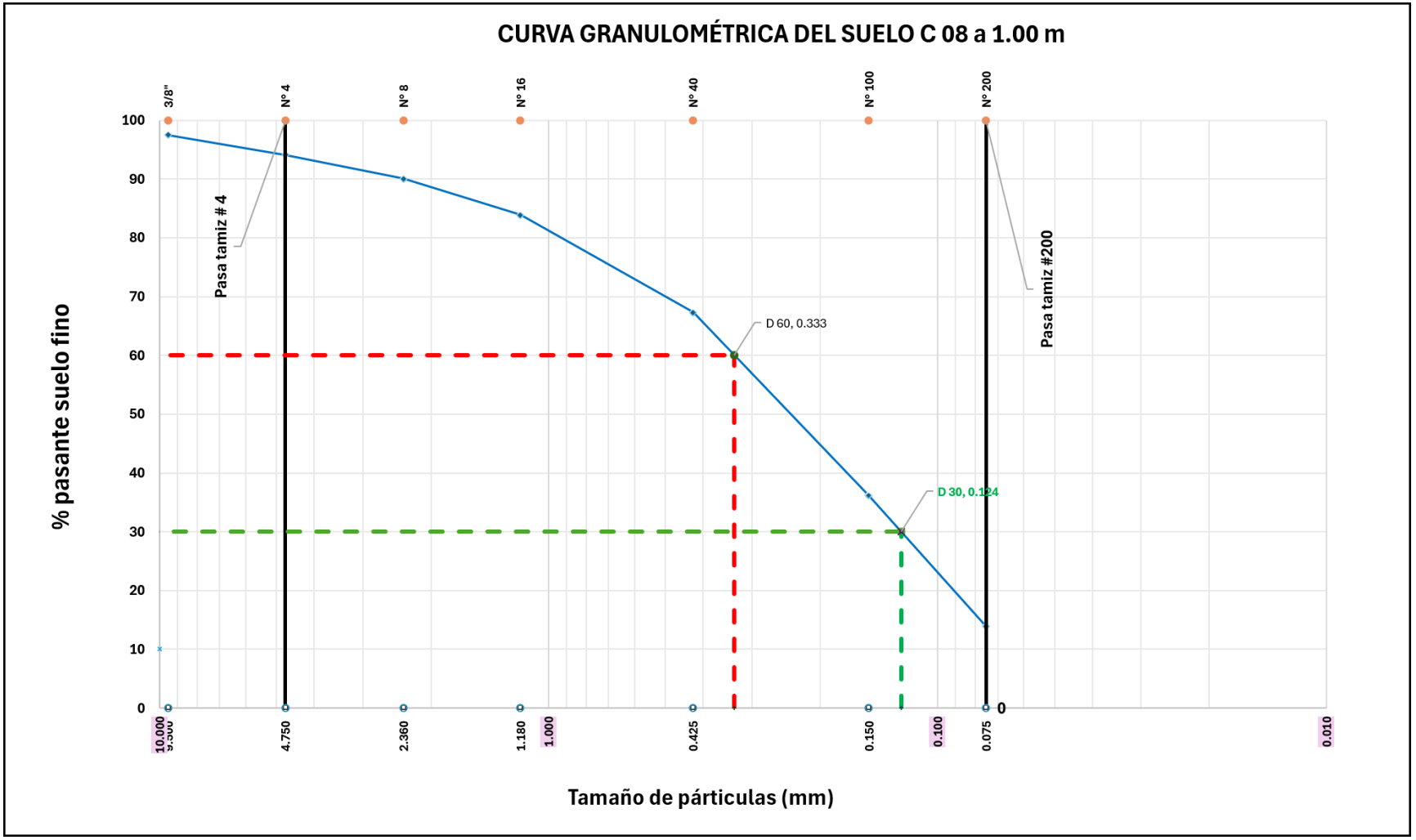


Figura A5-3. Curva granulométrica representativa del pie del talud



A5.4. Clasificación SUCS

Ficha A5-4.

Cálculo y clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

ID Muestra	% Pasa #4	% Pasa #200	LL (%)	LP (o 'NP')	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	% Finos (#200)	% Grava (>#4)	% Arena (#4-#200)	¿Fino/Grueso?	Tipo (S/G)	Rango finos	IP (num)	IP (reporte)	Cu	Cc	Gradación (W/P)	Tipo finos (M/C)	SUCS	Descripción
C01-0.50	98.25	18.10	31.09	NP	No aplica	0.10	1.05	18.10	1.75	80.15	GRUESO	S	>12%	0.00	NP				M	SM	Arena limosa
C02-1.00	70.44	11.18	23.39	NP	0.08	0.26	2.12	11.18	29.56	59.25	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP	28.32	0.42	P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo
C03-0.50	86.36	6.24	34.20	NP	0.10	0.31	1.02	6.24	13.64	80.12	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP	10.19	0.92	P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo
C04-1.00	98.58	21.38	36.90	NP	No aplica	0.09	0.23	21.38	1.42	77.19	GRUESO	S	>12%	0.00	NP				M	SM	Arena limosa
C05-0.50	81.30	7.65	26.26	NP	0.08	0.21	1.01	7.65	18.70	73.66	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP	11.92	0.51	P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo
C06-1.50	88.11	7.23	26.70	NP	0.09	0.24	0.81	7.23	11.89	80.88	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP	9.03	0.81	P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo
C07-0.50	83.10	5.91	25.67	NP	0.10	0.25	0.88	5.91	16.90	77.19	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP	9.07	0.75	P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo
C08-1.00	94.11	13.93	28.60	NP	No aplica	0.12	0.33	13.93	5.89	80.18	GRUESO	S	>12%	0.00	NP				M	SM	Arena limosa
C09-1.00	91.16	11.29	24.72	NP	No aplica	0.17	0.55	11.29	8.84	79.87	GRUESO	S	5–12%	0.00	NP			P	M	SP-SM	Arena mal gradada con limo

Nota. Las fichas muestran la clasificación de los suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

A5.5. Gravedad específica

Ficha A5-5. *Cálculo de gravedad específica de sólidos*

DESCRIPCIÓN			Arena limosa	Arena mal gradada con limo	Arena mal gradada con limo	Arena limosa	Arena mal gradada con limo	Arena mal gradada con limo	Arena mal gradada con limo	Arena limosa	Arena mal gradada con limo
N° Muestra o Picnómetro			H - 01	H - 05	H - 07	H - 11	H - 13	H - 18	H - 19	H - 22	H - 24
			SM	SP-SM	SP-SM	SM	SP-SM	SP-SM	SP-SM	SM	SP-SM
Preparación del ensayo											
Masa promedio del picnómetro, calib.	Mp	g	148.87	147.02	182.82	148.87	182.82	147.02	148.87	182.82	147.02
Masa del picnómetro + agua, calib.	Mpw,c	g	645.98	643.90	680.21	645.98	680.21	643.90	645.98	680.21	643.90
Temperatura de calibración	Tc	°C	24.3	17.4	17.2	17.2	17.1	17.4	17.5	17.3	17.3
Densidad de masa del agua, calib.	ρw,c	g/ml	0.99722	0.99871	0.99874	0.99874	0.99876	0.99871	0.99869	0.99872	0.99872
Volumen del picnómetro	Vp	mL	498.50	497.52	498.02	497.74	498.01	497.52	497.76	498.03	497.52
Procedimiento Operativo											
Masa promedio del picnómetro.	Mp	g	148.87	147.02	182.82	148.87	182.82	147.02	148.87	182.82	147.02
M. del picnomet. + agua + suelo	Mpws,t	g	687.31	689.82	724.02	690.83	726.61	690.17	695.78	724.29	692.77
Temperatura de ensayo	Tt	°C	24.3	24.9	25.0	27.1	24.1	24.3	24.9	25.0	27.1
Densidad de masa del agua, ens.	ρw,t	g/mL	0.99722	0.99707	0.99705	0.99649	0.99727	0.99722	0.99707	0.99705	0.99649
Masa del suelo seco	Ms	g	72.35	75.04	75.20	75.04	75.08	75.21	80.09	75.25	75.54
Masa del picnómetro + agua	Mpw,t	g	645.98	643.08	679.37	644.86	679.47	643.16	645.17	679.38	642.79
Gravedad específica de suelo	Gt		2.332	2.651	2.462	2.581	2.687	2.667	2.716	2.480	2.955
Factor de corrección por temperatura	K		0.99902	0.99887	0.99884	0.99828	0.99907	0.99902	0.99887	0.99884	0.99828
Gravedad específica de suelos	G20°C		2.330	2.648	2.459	2.577	2.685	2.665	2.713	2.477	2.950

Fórmulas (referencia):

$V_p = (M_{pw,c} - M_p) / \rho_{w,c}$
$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t})$
$G_t = M_s / (M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s))$
$G_{20°C} = K * G_t$
$K = \rho_w(T) / \rho_w(20\ °C)$ (tomado de la tabla de temperatura)

Nota. Las fichas muestran el procedimiento de cálculo empleado para obtener la gravedad específica de los sólidos.

A5.6. Densidad máxima y mínima

Ficha A5-6. *Cálculo de densidad máxima y mínima*

Cálculo de densidad máxima y mínima de zona Cresta – (Representativa)

DESCRIPCIÓN		DENSIDAD RELATIVA DE SUELO		
N° de Ensayo (C-01 a 0.50 m)		I	II	III
Muestra		M-01	M-02	M-03
Características geométricas				
Altura del recipiente cilíndrico (h)	cm	20.50	20.50	20.50
Diámetro interno del recipiente cilíndrico (D)	cm	11.00	11.00	11.00
Volumen del recipiente cilíndrico (V)	cm³	1948.18	1948.18	1948.18
Procedimiento Operativo				
Masa de recipiente cilíndrico (m1 o m3)	g	2366.50	2366.50	2366.50
Masa de recipiente cilíndrico + muestra en estado suelto (m2)	g	4689.00	4668.50	4642.50
Masa del recipiente cilíndrico + muestra compactada (m4)	g	5032.00	5039.00	5015.50
Masa Volumétrica Seca Mínima (ρmin)	g/cm³	1.19	1.18	1.17
$\rho min = (m2 - m1) / V$		1.18		
Masa Volumétrica Seca Máxima (ρmax)	g/cm³	1.37	1.37	1.36
$\rho max = (m4 - m3) / V$		1.367		

Cálculo de densidad máxima y mínima de zona Media – (Representativa)

DESCRIPCIÓN		DENSIDAD RELATIVA DE SUELO		
N° de Ensayo (C-05 a 0.50m)		I	II	III
Muestra		M-01	M-02	M-03
Características geométricas				
Altura del recipiente cilíndrico (h)	cm	20.50	20.50	20.50
Diámetro interno del recipiente cilíndrico (D)	cm	11.00	11.00	11.00
Volumen del recipiente cilíndrico (V)	cm^3	1948.18	1948.18	1948.18
Procedimiento Operativo				
Masa de recipiente cilíndrico (m1 o m3)	g	2366.50	2366.50	2366.50
Masa de recipiente cilíndrico + muestra en estado suelto (m2)	g	4570.50	4602.00	4644.00
Masa del recipiente cilíndrico + muestra compactada (m4)	g	5343.00	5321.00	5355.50
Masa Volumétrica Seca Mínima (ρmin)	g/cm^3	1.13	1.15	1.17
$\rho min = (m2 - m1) / V$		1.15		
Masa Volumétrica Seca Máxima (ρmax)	g/cm^3	1.53	1.52	1.53
$\rho max = (m4 - m3) / V$		1.526		

Cálculo de densidad máxima y mínima de zona Pie – (Representativa)

DESCRIPCIÓN		DENSIDAD RELATIVA DE SUELO		
N° de Ensayo (C-08 a 1.00 m)		I	II	III
Muestra		M-01	M-02	M-03
Características geométricas				
Altura del recipiente cilíndrico (h)	cm	20.5	20.5	20.5
Diámetro interno del recipiente cilíndrico (D)	cm	11.0	11.0	11.0
Volumen del recipiente cilíndrico (V)	cm^3	1948.18	1948.18	1948.18
Procedimiento Operativo				
Masa de recipiente cilíndrico (m1 o m3)	g	2367	2367	2367
Masa de recipiente cilíndrico + muestra en estado suelto (m2)	g	4428	4427	4451
Masa del recipiente cilíndrico + muestra compactada (m4)	g	4836	4842	4885
Masa Volumétrica Seca Mínima (ρmin)	g/cm^3	1.058	1.058	1.070
$\rho min = (m2 - m1) / V$			1.062	
Masa Volumétrica Seca Máxima (ρmax)	g/cm^3	1.268	1.271	1.292
$\rho max = (m4 - m3) / V$			1.277	

Nota. Las fichas muestran el procedimiento de cálculo empleado para determinar la densidad máxima y mínima de los materiales granulares.

A5.7. Permeabilidad

Tabla A5-7.

Resultados del ensayo de permeabilidad

CALICATA N°	masa (g)	ENSAYO N°	GASTO DE AGUA DESCARGADA	Tiempo t	Temp	Velocidad (flujo laminar), v	Gradiente Hidráulico (i)	Coeficiente de Permeabilidad	Corrección por temperatura a 20 °C	Coeficiente de Permeabilidad
			cm³	s	°C	Q/(A.t) (cm/s)	h1/L1	k (cm/s)		k (cm/s)
C-01 a 0.50 m	737.5	1	200	565	24.4	0.0076	6.67	0.00114	0.90118	0.00103
		2	200	581	24.4	0.0074	6.67	0.00111	0.90118	0.00100
		3	200	595	24.4	0.0072	6.67	0.00108	0.90118	0.00098
C-05 a 0.50 m	882	1	100	854	24.3	0.0025	6.67	0.00038	0.90326	0.00034
		2	100	896	24.3	0.0024	6.67	0.00036	0.90326	0.00032
		3	100	857	24.3	0.0025	6.67	0.00038	0.90326	0.00034
C-08 a 1.00 m	802	1	250	520	24.1	0.0103	6.67	0.00155	0.90743	0.00141
		2	250	517	24.1	0.0104	6.67	0.00156	0.90743	0.00141
		3	250	537	24.1	0.0100	6.67	0.00150	0.90743	0.00136

Nota. El ensayo de permeabilidad permitió evaluar de manera complementaria la capacidad de flujo del agua a través de los materiales granulares seleccionados.

ANEXO 6. Resultados detallados del ensayo de corte directo

El presente anexo muestra el desarrollo detallado del ensayo de corte directo realizado a las muestras representativas seleccionadas para el análisis de estabilidad. Este ensayo permitió determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo, específicamente la cohesión y el ángulo de fricción interna, los cuales fueron empleados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad mediante Slide V6.004.

Para el ensayo de corte directo se consideraron tres muestras representativas del área de estudio: C-01, asociada a la cresta del talud; C-05, correspondiente a la zona media; y C-08, correspondiente al pie del talud. Cada muestra fue ensayada bajo tres esfuerzos normales, permitiendo construir la envolvente de falla y obtener los parámetros resistentes mediante el criterio de Mohr-Coulomb.

La resistencia al corte fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Donde:

- τ= esfuerzo cortante de falla
- σ= esfuerzo normal aplicado
- c= cohesión
- ϕ= ángulo de fricción interna.

Asimismo, para el cálculo del esfuerzo cortante máximo se empleó la siguiente relación:

$$\tau = \frac{F_{máx}}{A}$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante máximo
- $F_{máx}$ = Fuerza máxima de corte
- A=Área de la caja de corte
    - A=3600 mm^2=0.0036 m^2

Tabla A6-1.

Resumen de parámetros obtenidos del ensayo de corte directo

Zona evaluada	Muestra	Profundidad (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)
Cresta	C-01	0.50	12.78	14.64	27.94
Zona media	C-05	0.50	15.57	0.85	33.36
Pie del talud	C-08	1.00	20.06	13.87	30.73

Nota. Los parámetros obtenidos mediante el ensayo de corte directo sirvieron de base para definir los datos de entrada del modelamiento bidimensional. Para el ángulo de fricción interna se adoptaron en Slide V6.004 los valores redondeados de 28.00°, 33.00° y 31.00° para cresta, zona media y pie del talud, respectivamente.

A6.1. Ensayo de corte directo – muestra C-01, cresta

La muestra C-01 fue considerada representativa de la cresta del talud. Para esta muestra se realizó el cálculo del peso unitario y del esfuerzo cortante máximo en tres ensayos de corte directo.

Tabla A6-2

Cálculo del peso unitario de la muestra C-01

Ensayo	Área de caja (mm^2)	Altura (mm)	Masa de muestra (g)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	γ ($\rho \cdot g$) (kN/m^3)
A	3600	27	117.00	97.20	1.203	11.80
B	3600	25	125.00	90.00	1.389	13.63
C	3600	25	118.50	90.00	1.316	12.91

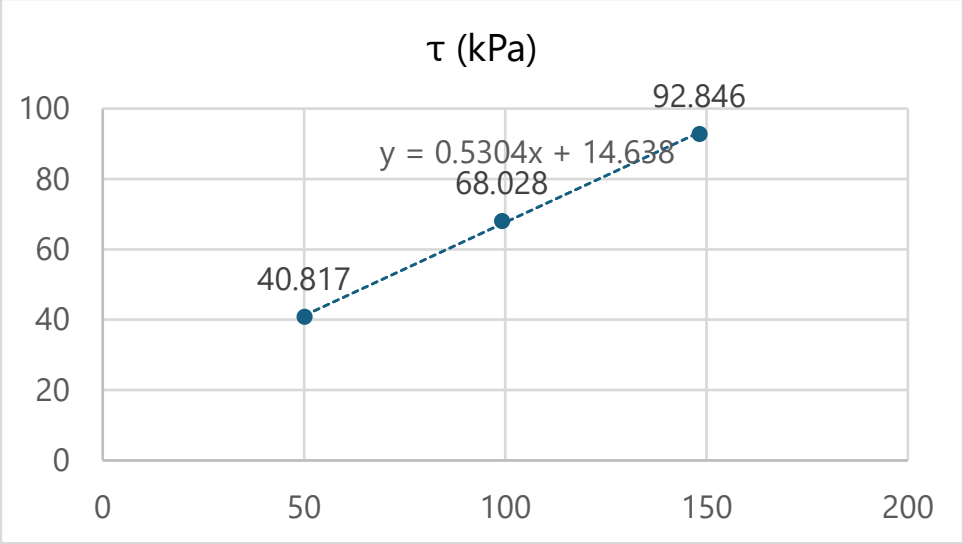
Nota. El peso unitario promedio representativo de la muestra C-01 fue $\gamma = 12.78$ kN/m^3.

Tabla A6-3

Resultados del esfuerzo cortante máximo para la muestra C-01

Ensayo	σ (kPa)	Fmáx (N)	τ (kPa)
A	50.11	146.939657	40.817
B	99.16	244.899428	68.028
C	148.21	334.247351	92.846

Figura A6-1. Envolvente de falla de la muestra C-01



Nota. La envolvente de falla de la muestra C-01 permitió obtener una cohesión de 14.64 kPa y un ángulo de fricción interna de 27.94°.

La envolvente de falla obtenida para la muestra C-01 se ajustó a la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Usando los tres pares (σ,τ) la recta ajustada es:

$$\tau = 14.638 + 0.5304\,\sigma$$

De aquí se obtiene directamente:

$$c = 14.638\ kPa$$

$$\tan \phi = 0.5304$$

Ahora se despeja el ángulo:

$$\phi = \arctan(0.5304)$$

$$\phi = 27.94°$$

A6.2. Ensayo de corte directo – muestra C-05, zona media

La muestra C-05 fue considerada representativa de la zona media del talud. Para esta muestra se realizó el cálculo del peso unitario y del esfuerzo cortante máximo en tres ensayos de corte directo.

Tabla A6-4

Cálculo del peso unitario de la muestra C-05

Ensayo	Área de caja (mm^2)	Altura (mm)	Masa de muestra (g)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	γ (kN/m^3)
A	3600	24	142.50	86.40	1.649	16.18
B	3600	25	140.00	90.00	1.556	15.26
C	3600	25	140.00	90.00	1.556	15.26

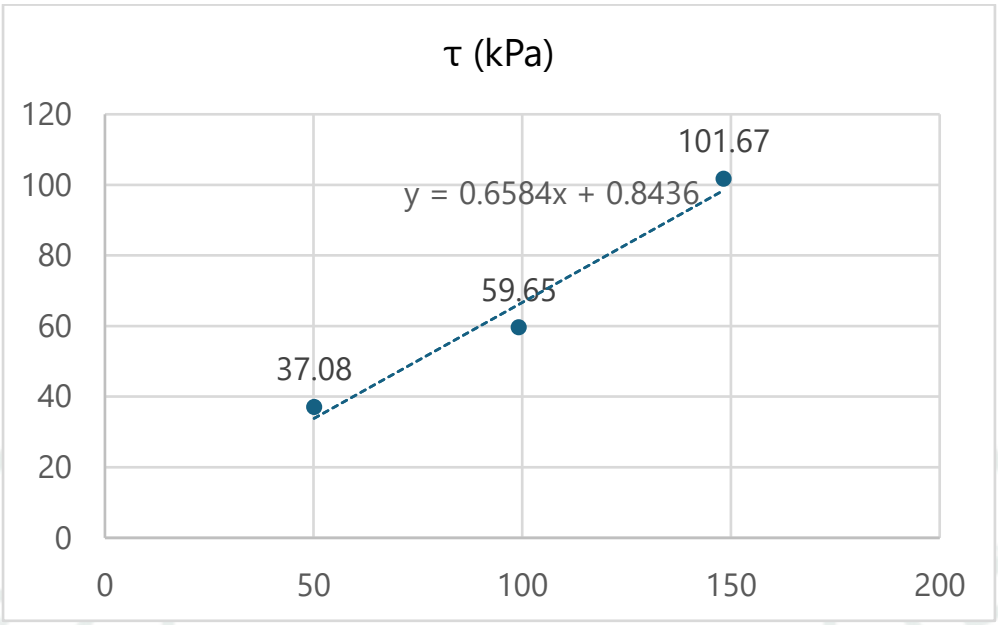
Nota. El peso unitario promedio representativo de la muestra C-05 fue $\gamma = 15.57$ kN/m^3.

Tabla A6-5

Resultados del esfuerzo cortante máximo para la muestra C-05

Ensayo	σ (kPa)	Fmáx (N)	τ (kPa)
A	50.11	133.483644	37.08
B	99.16	214.757960	59.65
C	148.21	366.003540	101.67

Figura A6-2. Envolvente de falla de la muestra C-05



Nota. La envolvente de falla de la muestra C-05 permitió obtener una cohesión de 0.85 kPa y un ángulo de fricción interna de 33.36°.

La envolvente de falla obtenida para la muestra C-05 se ajustó a la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Usando los tres pares (σ,τ) la recta ajustada es:

$$\tau = 0.8452 + 0.6584\,\sigma$$

De aquí se obtiene directamente:

$$c = 0.8452\ kPa$$

$$\tan \phi = 0.6584$$

Ahora se despeja el ángulo:

$$\phi = \arctan(0.6584)$$

$$\phi = 33.36°$$

A6.3. Ensayo de corte directo – muestra C-08, pie del talud

La muestra C-08 fue considerada representativa del pie del talud. Para esta muestra se realizó el cálculo del peso unitario y del esfuerzo cortante máximo en tres ensayos de corte directo.

Tabla A6-6

Cálculo del peso unitario de la muestra C-08

Ensayo	Área de caja (mm^2)	Altura (mm)	Masa de muestra (g)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	γ (kN/m^3)
A	3600	23	179.00	82.80	2.162	21.21
B	3600	24	171.00	86.40	1.980	19.42
C	3600	25	179.50	90.00	1.994	19.57

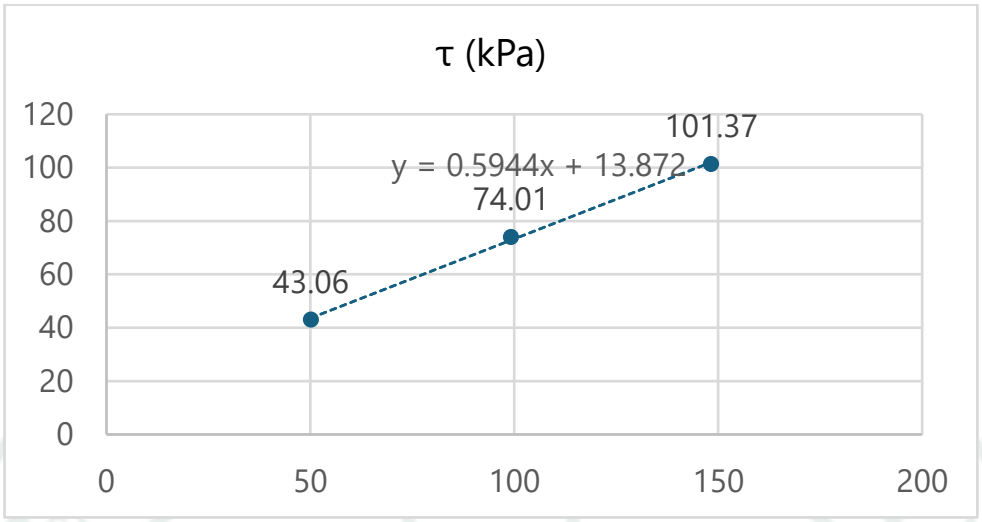
Nota. El peso unitario promedio representativo de la muestra C-08 fue $\gamma = 20.06$ kN/m^3.

Tabla A6-7

Resultados del esfuerzo cortante máximo para la muestra C-08

Ensayo	σ (kPa)	Fmáx (N)	τ (kPa)
A	50.11	155.013264	43.06
B	99.16	266.429048	74.01
C	148.21	364.927059	101.37

Figura A6-3. Envolvente de falla de la muestra C-08



Nota. La envolvente de falla de la muestra C-08 permitió obtener una cohesión de 13.87 kPa y un ángulo de fricción interna de 30.73°.

La envolvente de falla obtenida para la muestra C-08 se ajustó a la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

Usando los tres pares (σ,τ) la recta ajustada es:

$$\tau = 13.872 + 0.5944\,\sigma$$

De aquí se obtiene directamente:

$$c = 13.872\ kPa$$

$$\tan \phi = 0.5944$$

Ahora se despeja el ángulo:

$$\phi = \arctan(0.5944)$$

$$\phi = 30.73°$$

Por lo tanto, para la muestra C-08, representativa del pie del talud, se obtuvo una cohesión de 13.87 kPa, un ángulo de fricción interna de 30.73° y un peso unitario promedio de 20.06 kN/m³.

A6.4. Comparación de parámetros de resistencia al corte

Tabla A6-8

Comparación de parámetros obtenidos mediante el ensayo de corte directo

Zona evaluada	Muestra	γ (kN/m³)	c (kPa)	φ (°)	Interpretación
Cresta	C-01	12.78	14.64	27.94	Presenta cohesión moderada y menor peso unitario.
Zona media	C-05	15.57	0.85	33.36	Presenta la menor cohesión de las tres muestras y el mayor ángulo de fricción interna; su comportamiento debe interpretarse considerando conjuntamente los parámetros resistentes y el peso unitario asignados a la sección, bajo la geometría común de referencia.
Pie del talud	C-08	20.06	13.87	30.73	Presenta mayor peso unitario y resistencia moderada al corte.

Nota. Los parámetros de resistencia presentan diferencias entre las tres muestras representativas. La comparación directa entre secciones no permite atribuir los factores de seguridad a un único parámetro; la influencia individual de c, φ y γ se evalúa mediante el análisis de sensibilidad.

Los resultados del ensayo de corte directo permitieron obtener los parámetros resistentes utilizados en los modelos de estabilidad. La muestra C-05, correspondiente a la zona media del talud, presentó el menor valor de cohesión, mientras que las muestras C-01 y C-08 presentaron valores mayores. Estos resultados permitieron diferenciar el comportamiento resistente de las zonas evaluadas y sustentar la variabilidad geotécnica considerada en el modelamiento bidimensional de estabilidad.

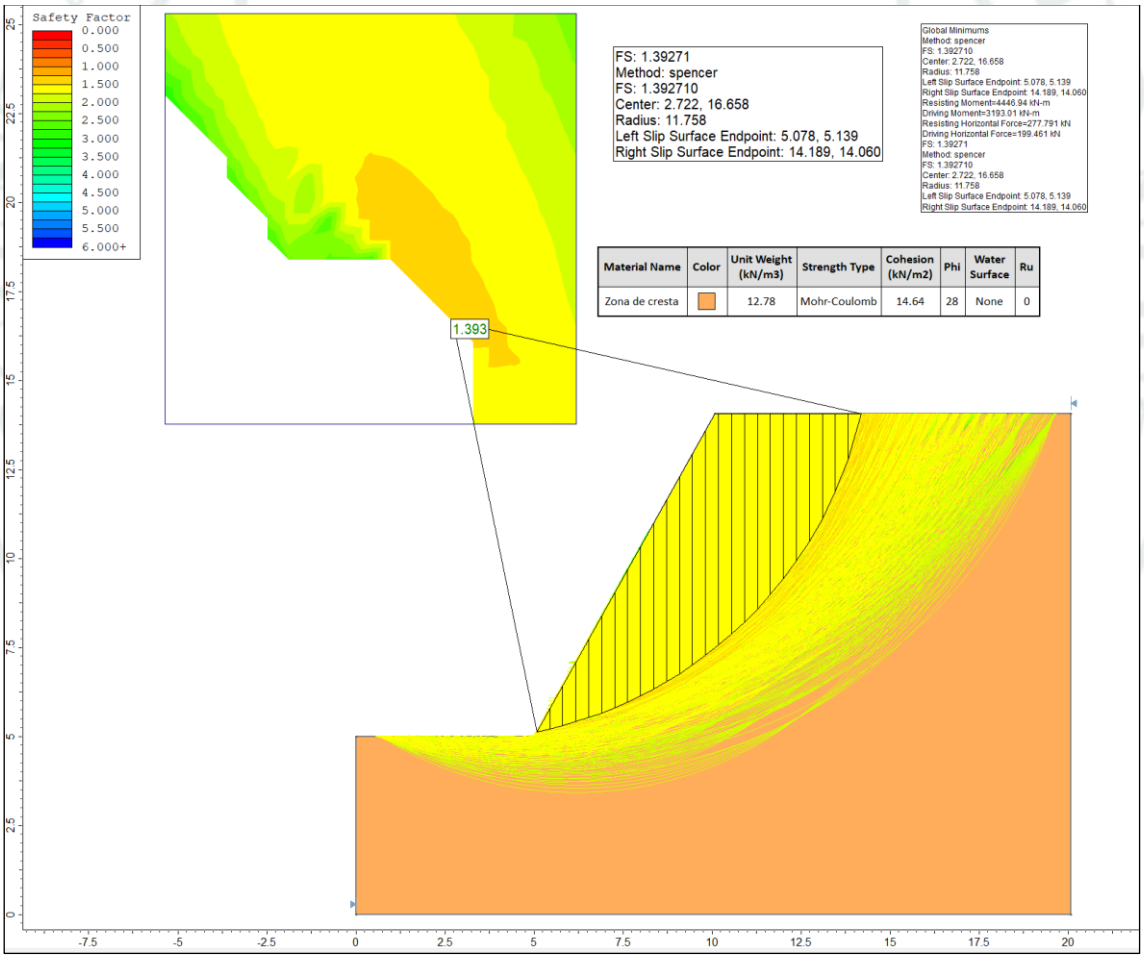
ANEXO 7. Modelamiento estático en Slide V6.004

El presente anexo muestra los resultados gráficos del modelamiento bidimensional de estabilidad en condición estática realizado mediante el software Slide V6.004. Para el análisis se empleó el criterio de resistencia Mohr-Coulomb y el método de equilibrio límite de Spencer, considerando los parámetros geotécnicos representativos de la cresta, zona media y pie del talud.

En esta condición no se incorporó acción sísmica, por lo que los factores de seguridad obtenidos representan el comportamiento del talud bajo cargas gravitacionales y condiciones geotécnicas estáticas.

A7.1. Modelamiento estático en la cresta del talud

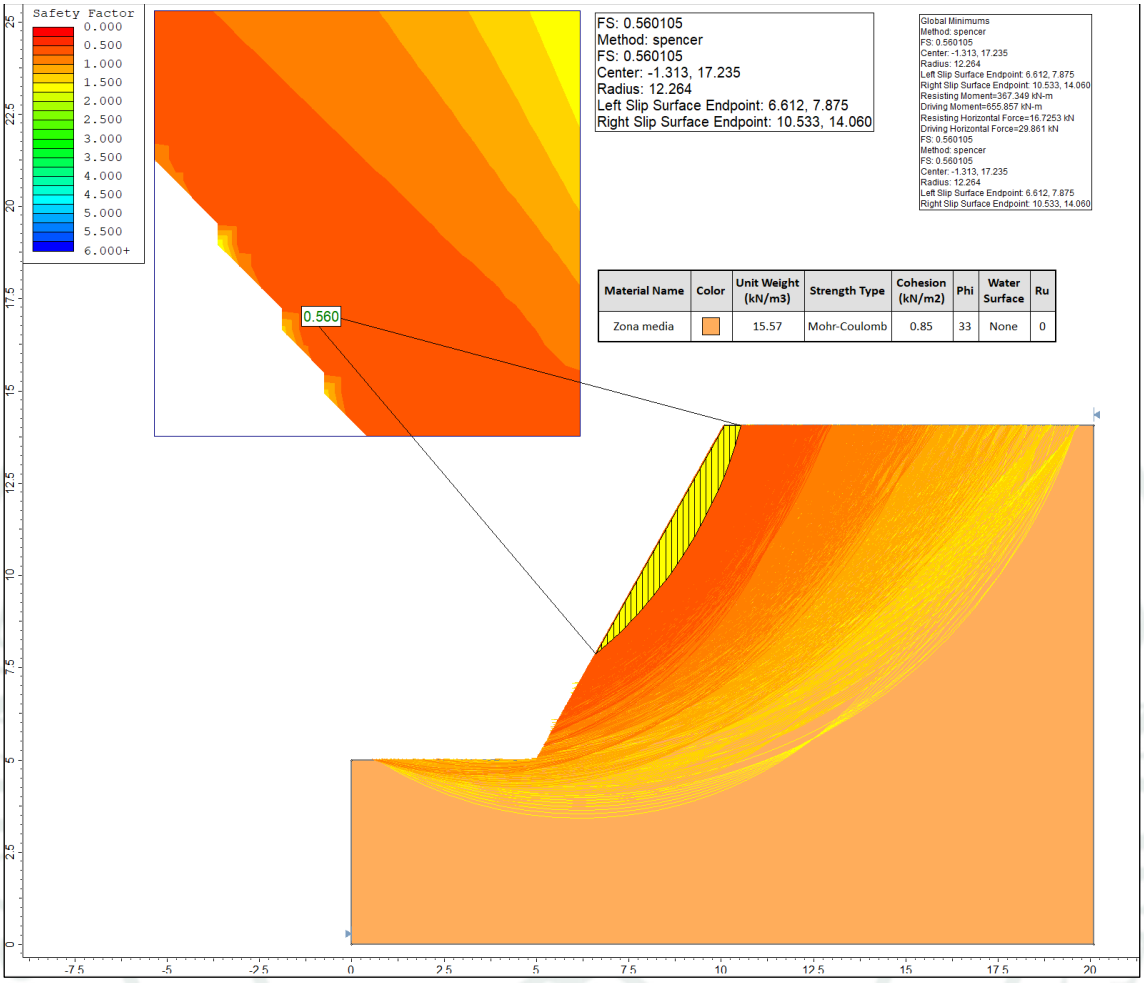
Figura A7-1. Modelamiento estático en la cresta del talud



Nota. Resultado obtenido mediante Slide V6.004, aplicando el método de Spencer y el criterio Mohr-Coulomb. La cresta presentó FS = 1.393, valor superior al equilibrio límite FS = 1.00, pero inferior al factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

A7.2. Modelamiento estático en la zona media del talud

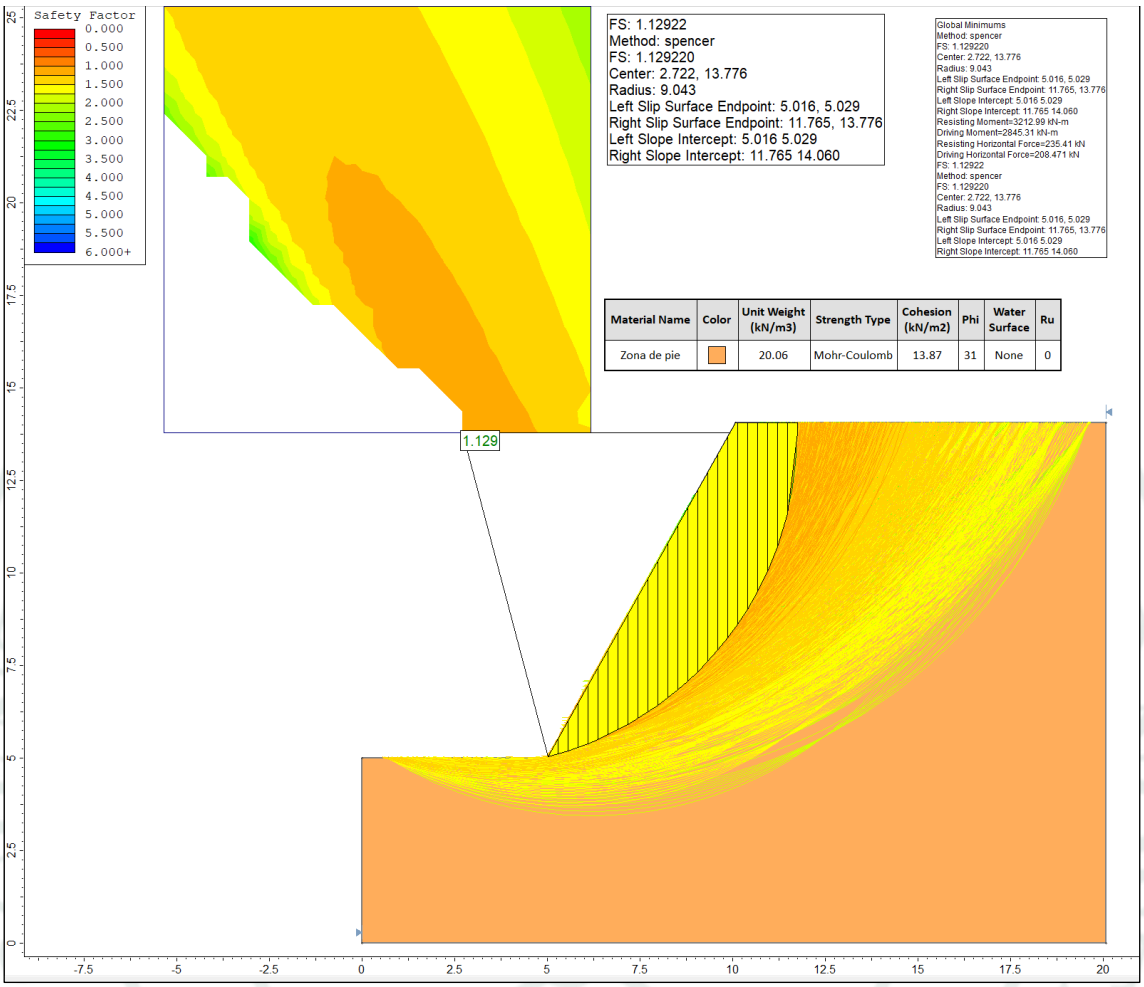
Figura A7-2. Modelamiento estático en la zona media del talud



Nota. Resultado obtenido mediante Slide V6.004, aplicando el método de Spencer y el criterio Mohr-Coulomb. La zona media presentó FS = 0.560, valor inferior al equilibrio límite FS = 1.00 y al factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

A7.3. Modelamiento estático en el pie del talud

Figura A7-3. Modelamiento estático en el pie del talud



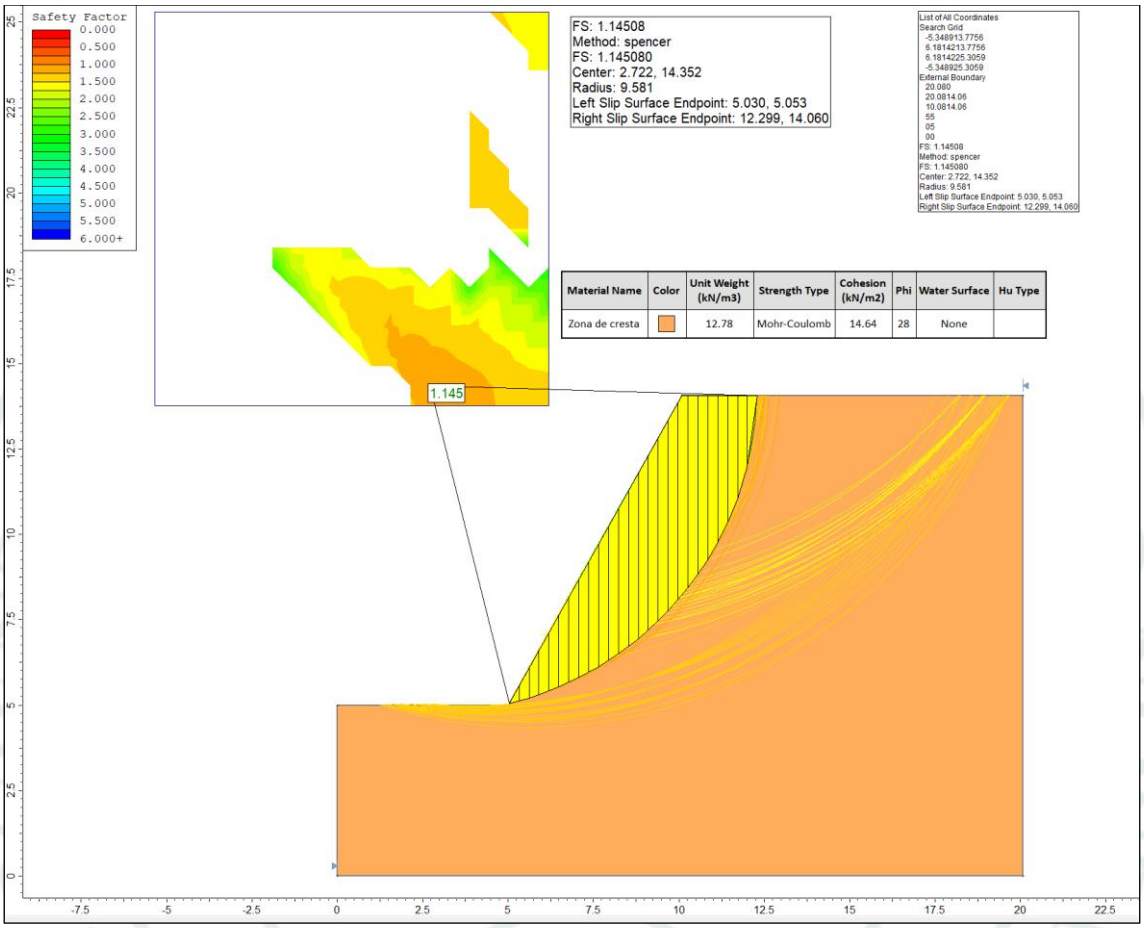
Nota. Resultado obtenido mediante Slide V6.004, aplicando el método de Spencer y el criterio Mohr-Coulomb. El pie del talud presentó FS = 1.129, valor superior al equilibrio límite FS = 1.00, pero inferior al factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

Los resultados gráficos respaldan los factores de seguridad estáticos empleados en el Capítulo IV. La zona media presentó el menor factor de seguridad, mientras que la cresta mostró el mayor valor relativo y el pie un valor intermedio. Ninguna de las tres secciones alcanzó el factor de seguridad mínimo estático FS = 1.50 adoptado como referencia.

ANEXO 8. Modelamiento pseudoestático en Slide V6.004

A8.1. Modelamiento pseudoestático en la cresta del talud

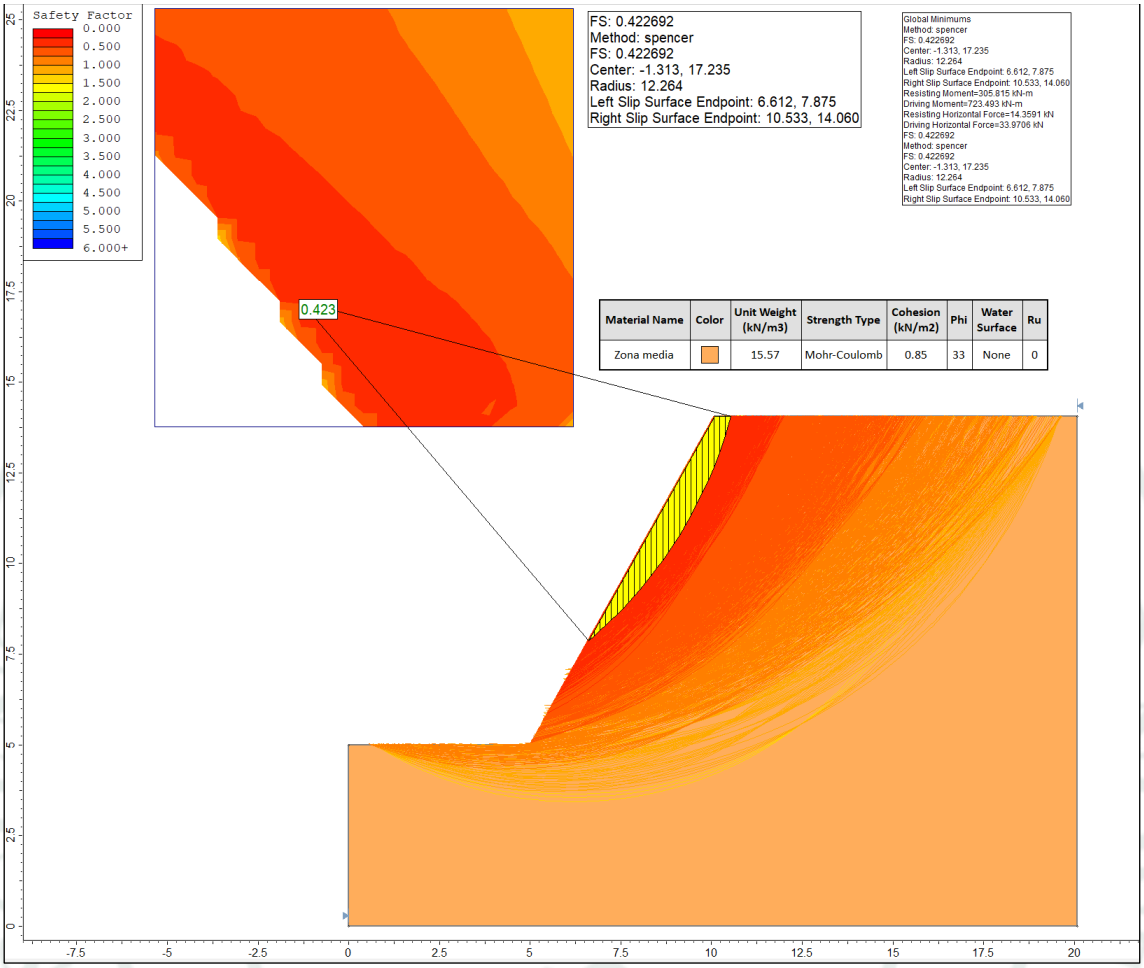
Figura A8-1. Modelamiento pseudoestático en la cresta del talud



Nota. La cresta presentó FS = 1.145, valor superior al equilibrio límite FS = 1.00, pero inferior al factor de seguridad mínimo sísmico FS = 1.25 adoptado como referencia.

A8.2. Modelamiento pseudoestático en la zona media del talud

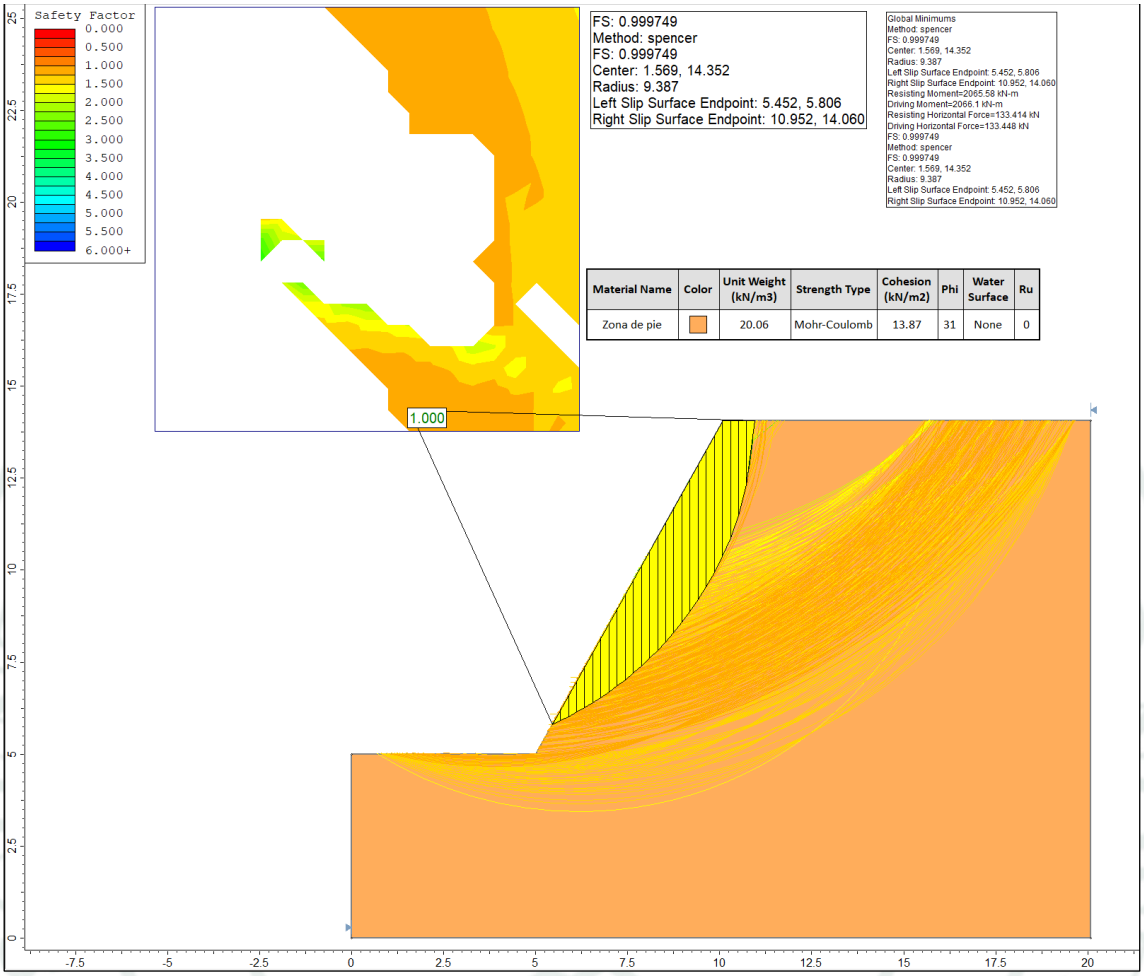
Figura A8-2. Modelamiento pseudoestático en la zona media del talud



Nota. La zona media presentó FS = 0.423, valor inferior al equilibrio límite FS = 1.00 y al factor de seguridad mínimo sísmico FS = 1.25 adoptado como referencia.

A8.3. Modelamiento pseudoestático en el pie del talud

Figura A8-3. Modelamiento pseudoestático en el pie del talud



Nota. El pie del talud presentó FS = 1.000, coincidiendo con la condición de equilibrio límite y permaneciendo por debajo del factor de seguridad mínimo sísmico FS = 1.25 adoptado como referencia.

Los resultados gráficos respaldan los factores de seguridad pseudoestáticos empleados en el Capítulo IV. Las tres secciones se encontraron por debajo del factor de seguridad mínimo sísmico FS = 1.25 adoptado como referencia; la zona media presentó FS<1.00 y el pie del talud alcanzó exactamente el equilibrio límite FS = 1.00.

ANEXO 9. Respaldo del análisis de sensibilidad en Slide V6.004

El presente anexo muestra capturas representativas del análisis de sensibilidad desarrollado mediante el software Slide V6.004. Este análisis permitió evaluar la variación del factor de seguridad frente a cambios individuales en la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal.

Los resultados consolidados del análisis de sensibilidad se presentan en el Capítulo IV, sección 4.5; por ello, en este anexo se incluyen únicamente evidencias gráficas representativas del proceso de modelamiento y evaluación de escenarios.

Para los parámetros geotécnicos c, φ y γ, se consideraron variaciones de -20 %, -10 %, valor base, +10 % y +20 %. Para el coeficiente sísmico horizontal se evaluaron los valores kh = 0.000, 0.0875, 0.175, 0.2625 y 0.350.

Tabla A9-1.

Escenarios representativos incluidos en el respaldo gráfico del análisis de sensibilidad

Zona evaluada	Cohesión	Ángulo de fricción	Peso unitario	Coeficiente sísmico
Cresta	c -20 %	φ -20 %	γ +20 %	kh = 0.350
Zona media	c -20 %	φ -20 %	γ +20 %	kh = 0.350
Pie del talud	c -20 %	φ -20 %	γ +20 %	kh = 0.350

Nota. Se muestran los escenarios más desfavorables o representativos del análisis de sensibilidad. Los valores completos del factor de seguridad para todos los escenarios evaluados se presentan en el Capítulo IV

A9.1. Capturas representativas en la cresta del talud

Figura A9-1. Sensibilidad de la cohesión en la cresta del talud: escenario c -20 %

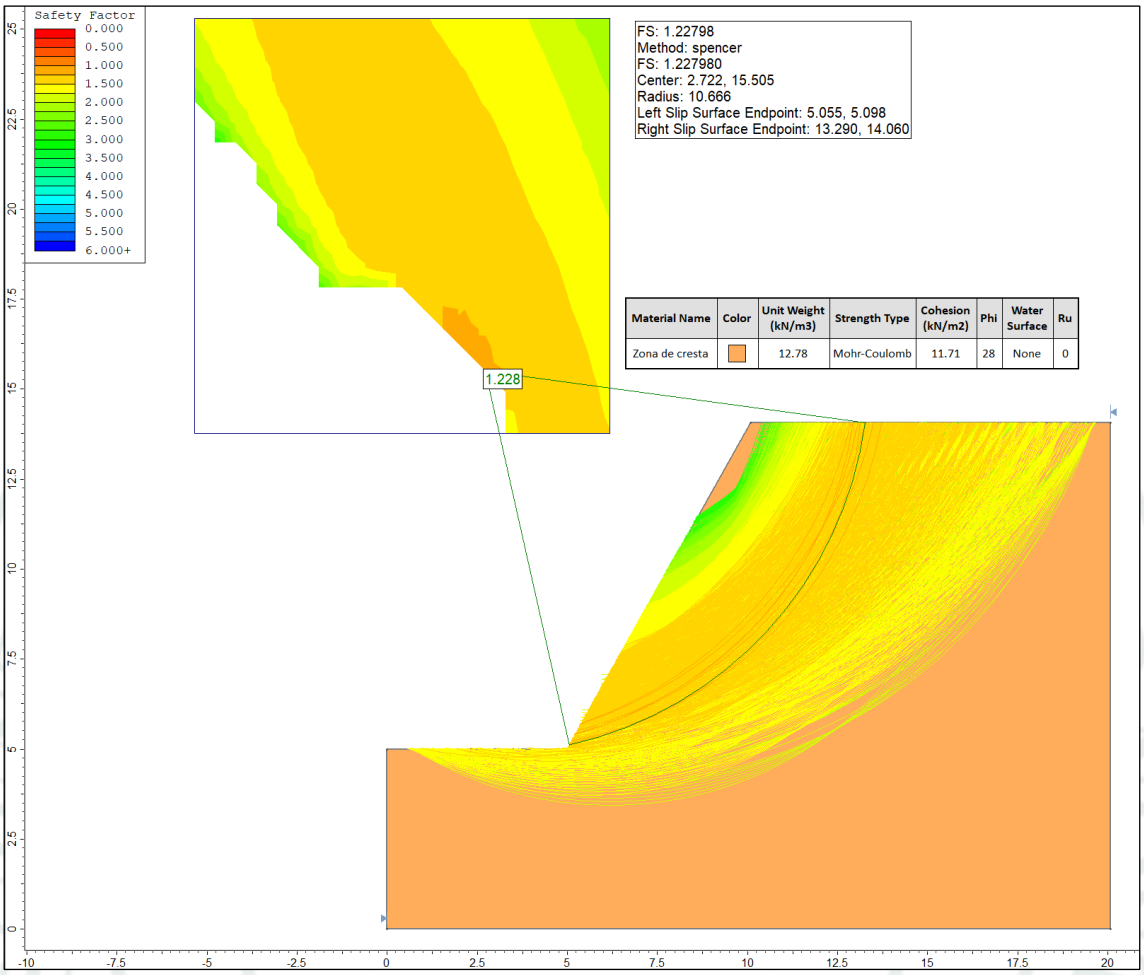


Figura A9-2. Sensibilidad del ángulo de fricción en la cresta del talud: escenario φ -20 %

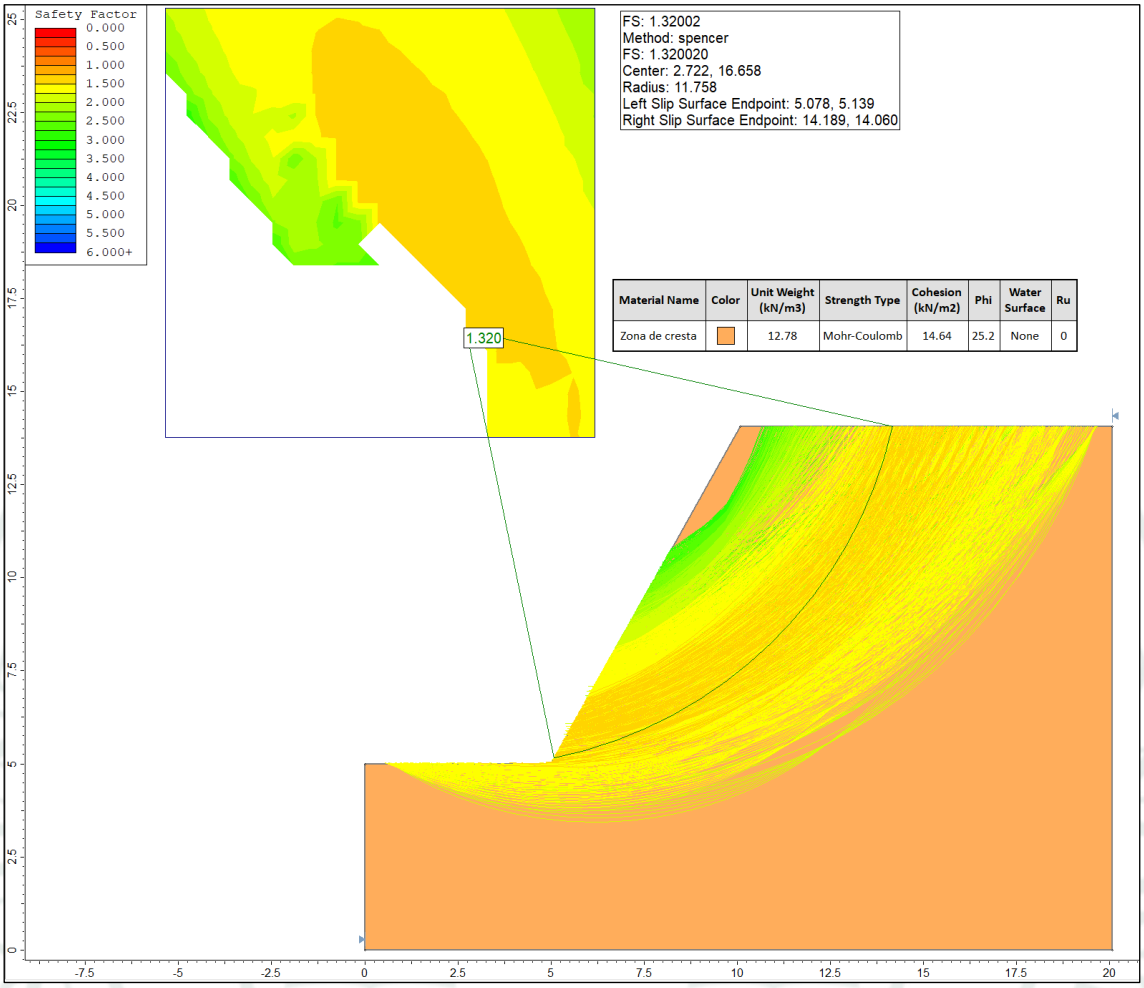


Figura A9-3. Sensibilidad del peso unitario en la cresta del talud: escenario γ +20 %

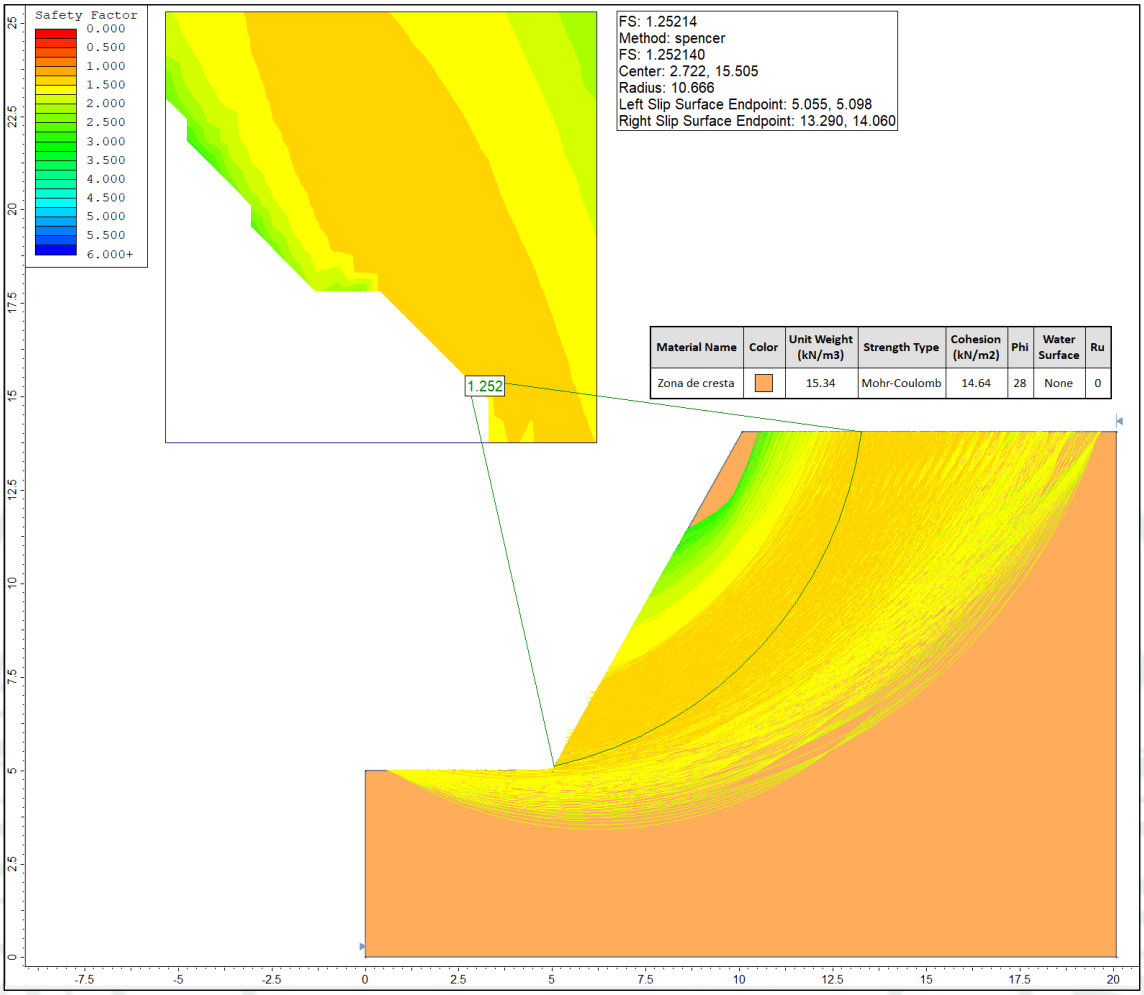
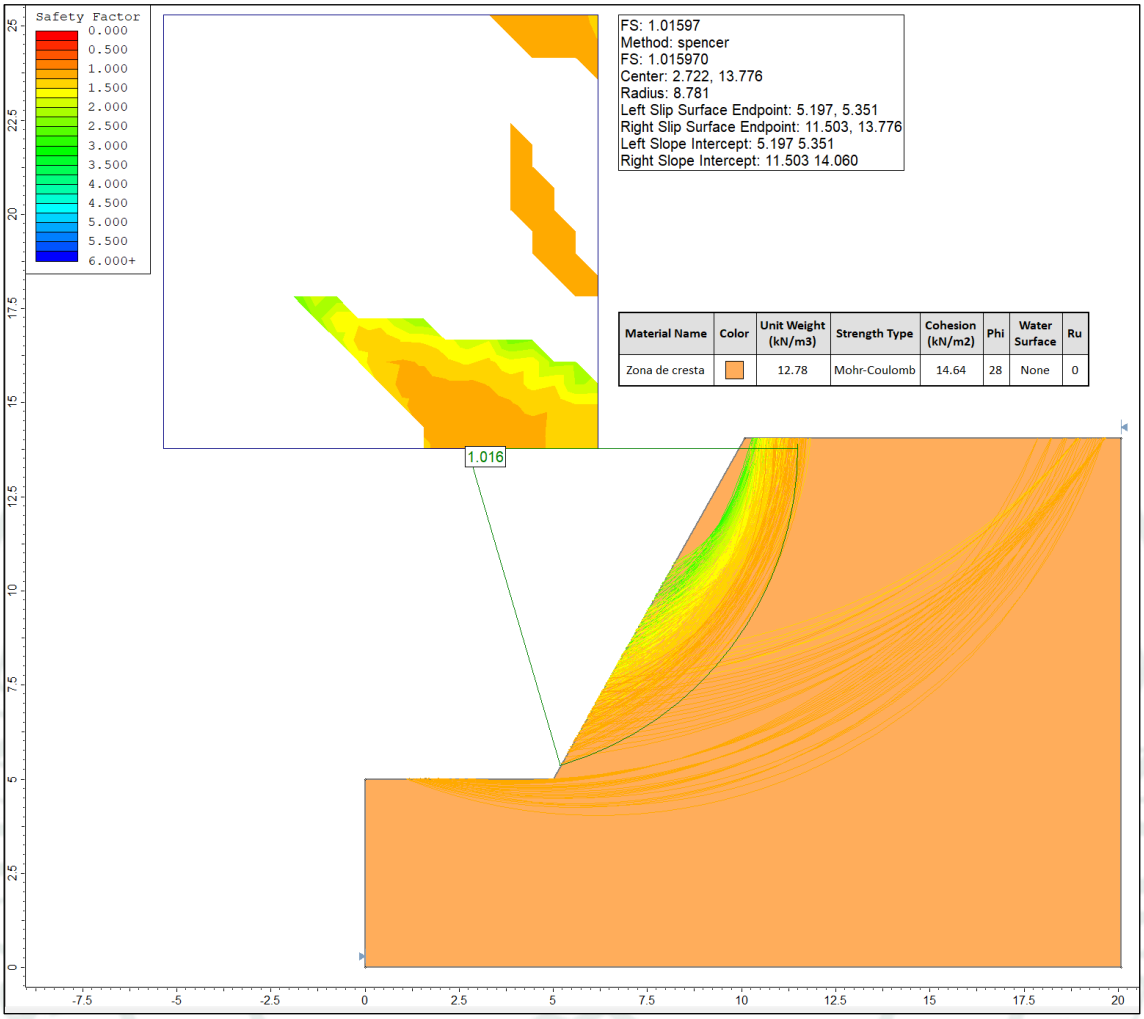


Figura A9-4. Sensibilidad del coeficiente sísmico en la cresta del talud: escenario kh = 0.350



A9.2. Capturas representativas en la zona media del talud

Figura A9-5. Sensibilidad de la cohesión en la zona media del talud: escenario c -20 %

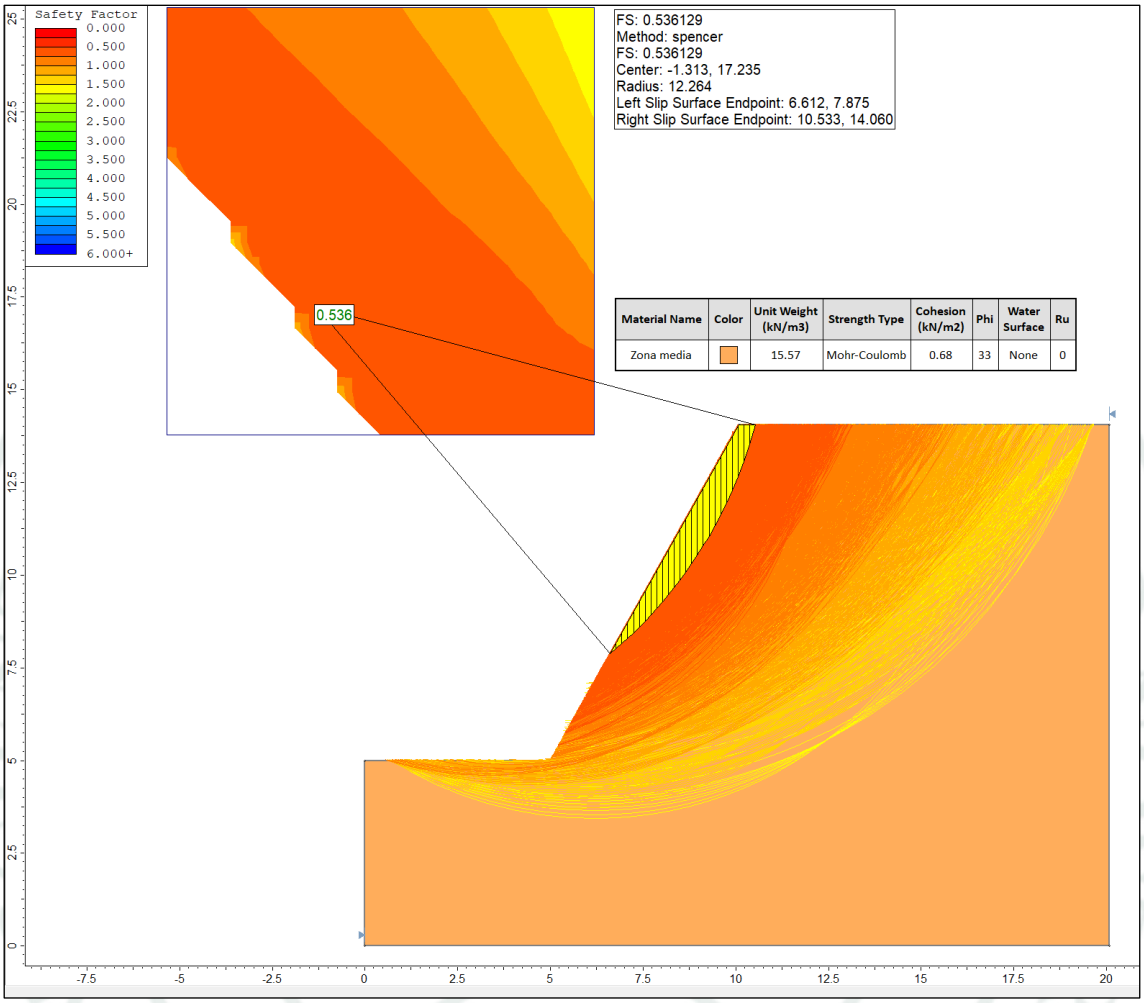


Figura A9-6. Sensibilidad del ángulo de fricción en la zona media del talud: escenario φ -20 %

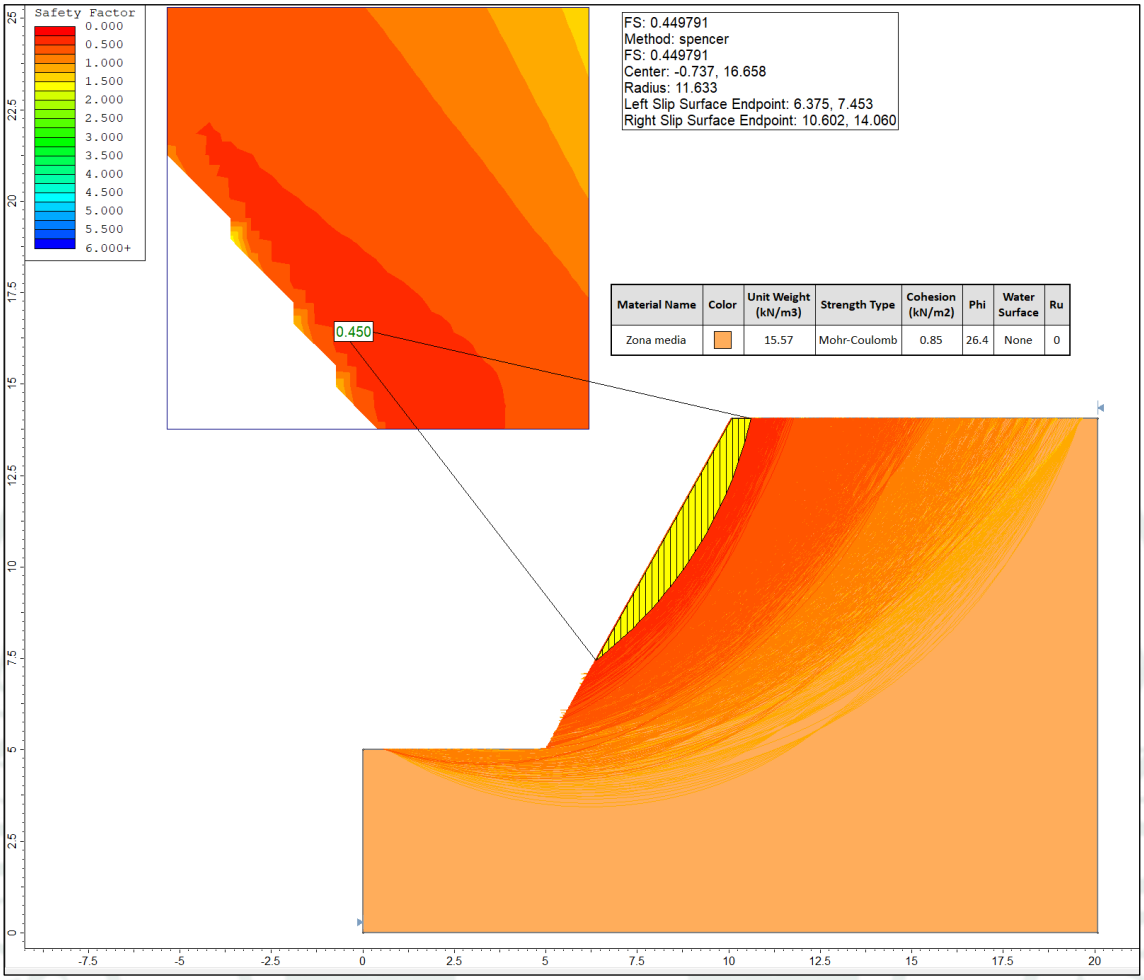


Figura A9-7. Sensibilidad del peso unitario en la zona media del talud: escenario γ +20 %

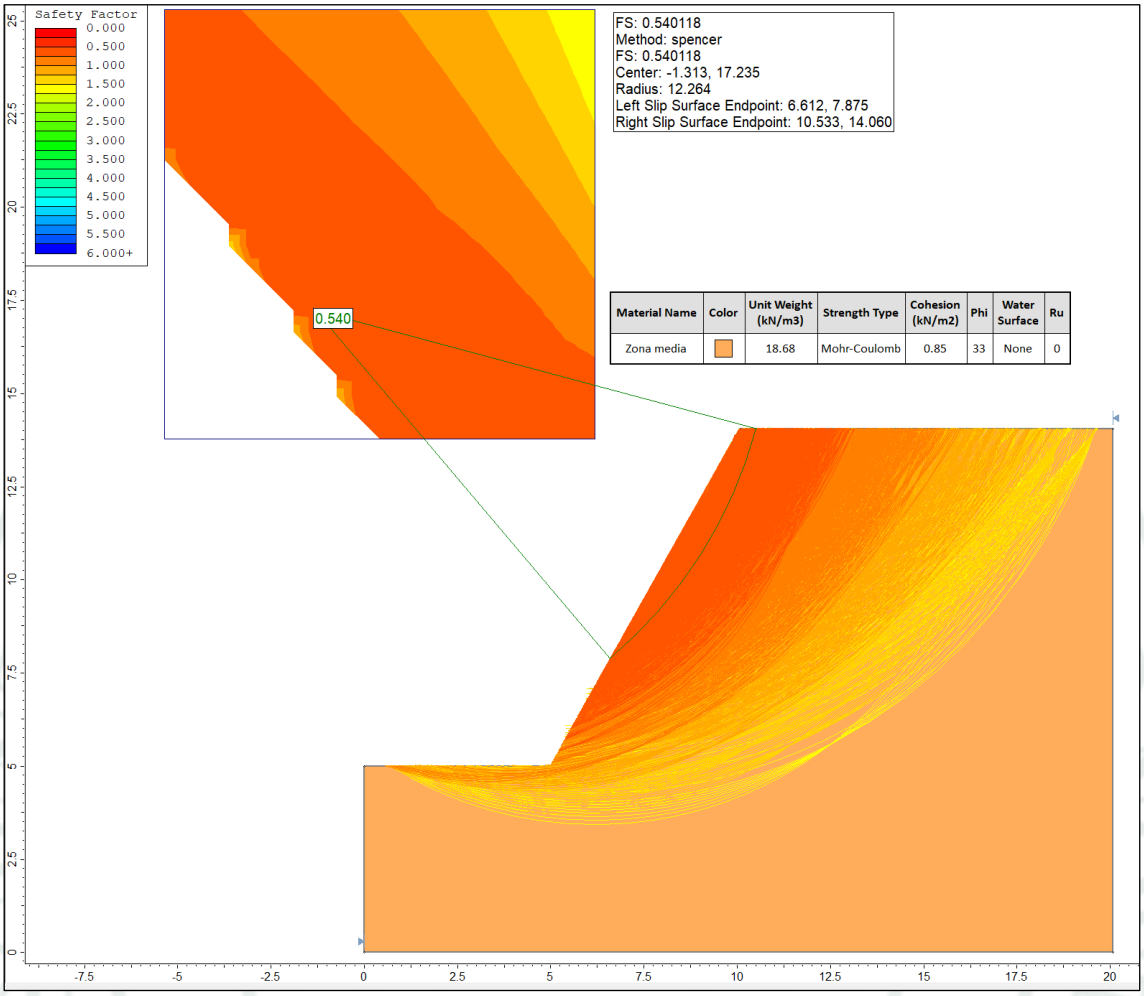
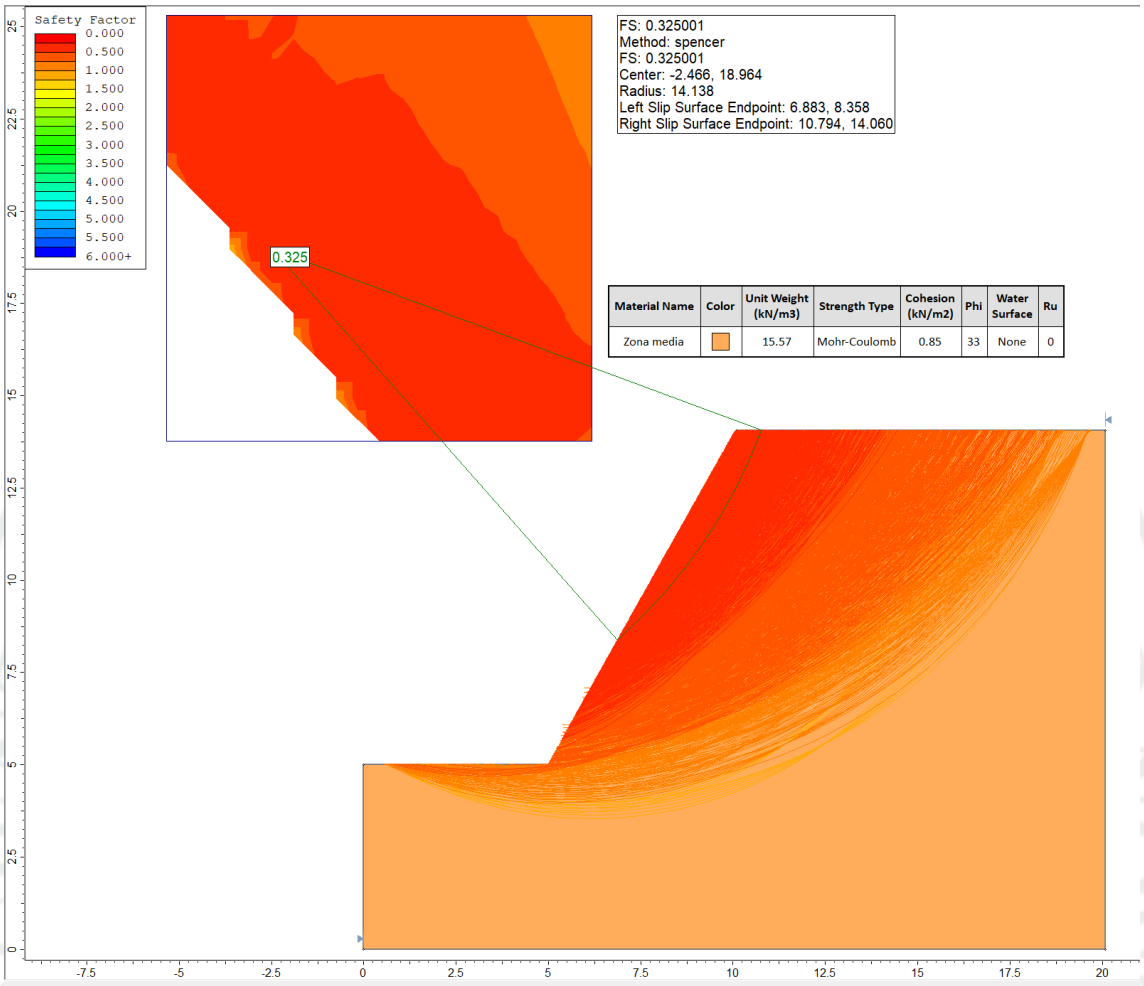


Figura A9-8. Sensibilidad del coeficiente sísmico en la zona media del talud: escenario kh = 0.350



A9.3. Capturas representativas en el pie del talud

Figura A9-9. Sensibilidad de la cohesión en el pie del talud: escenario c -20 %

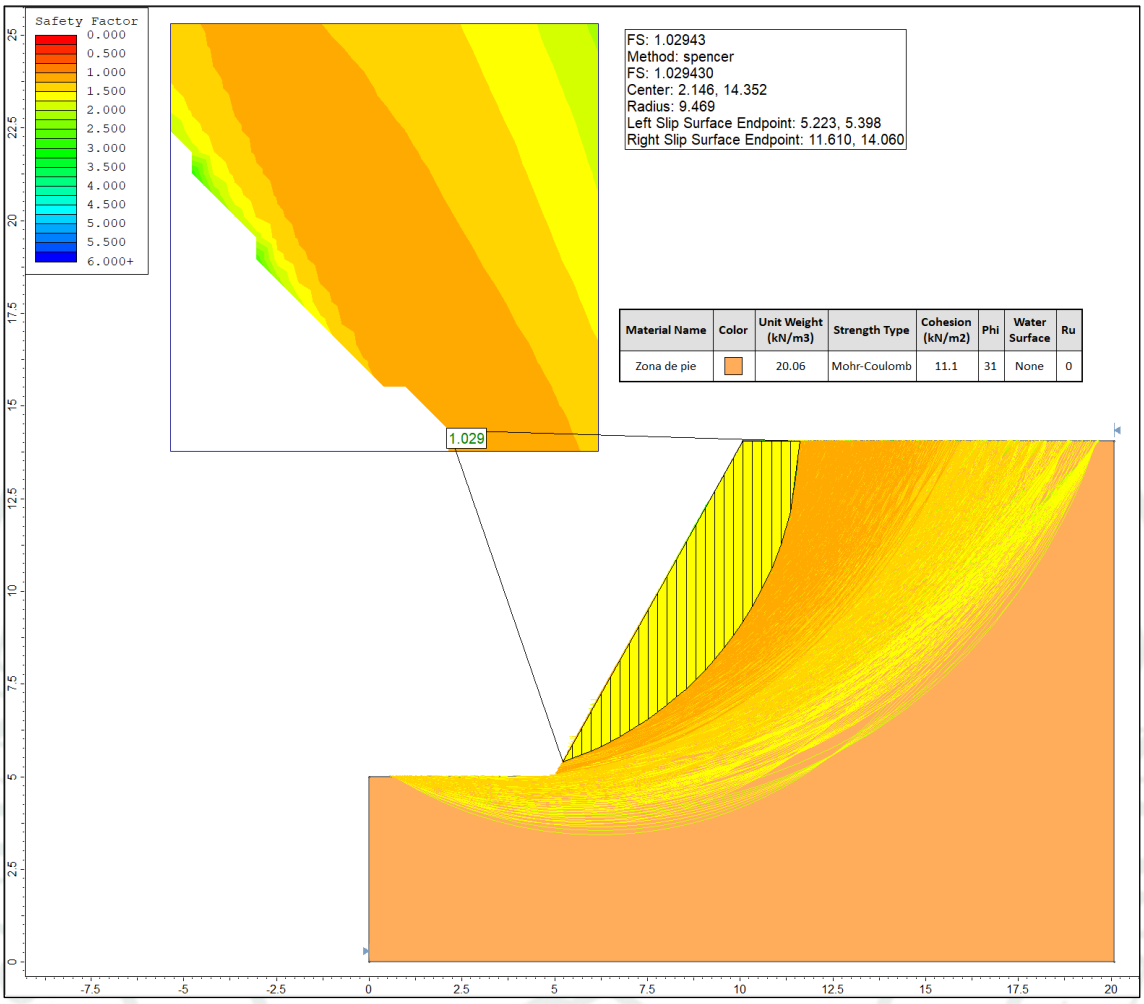


Figura A9-10. Sensibilidad del ángulo de fricción en el pie del talud: escenario φ -20 %

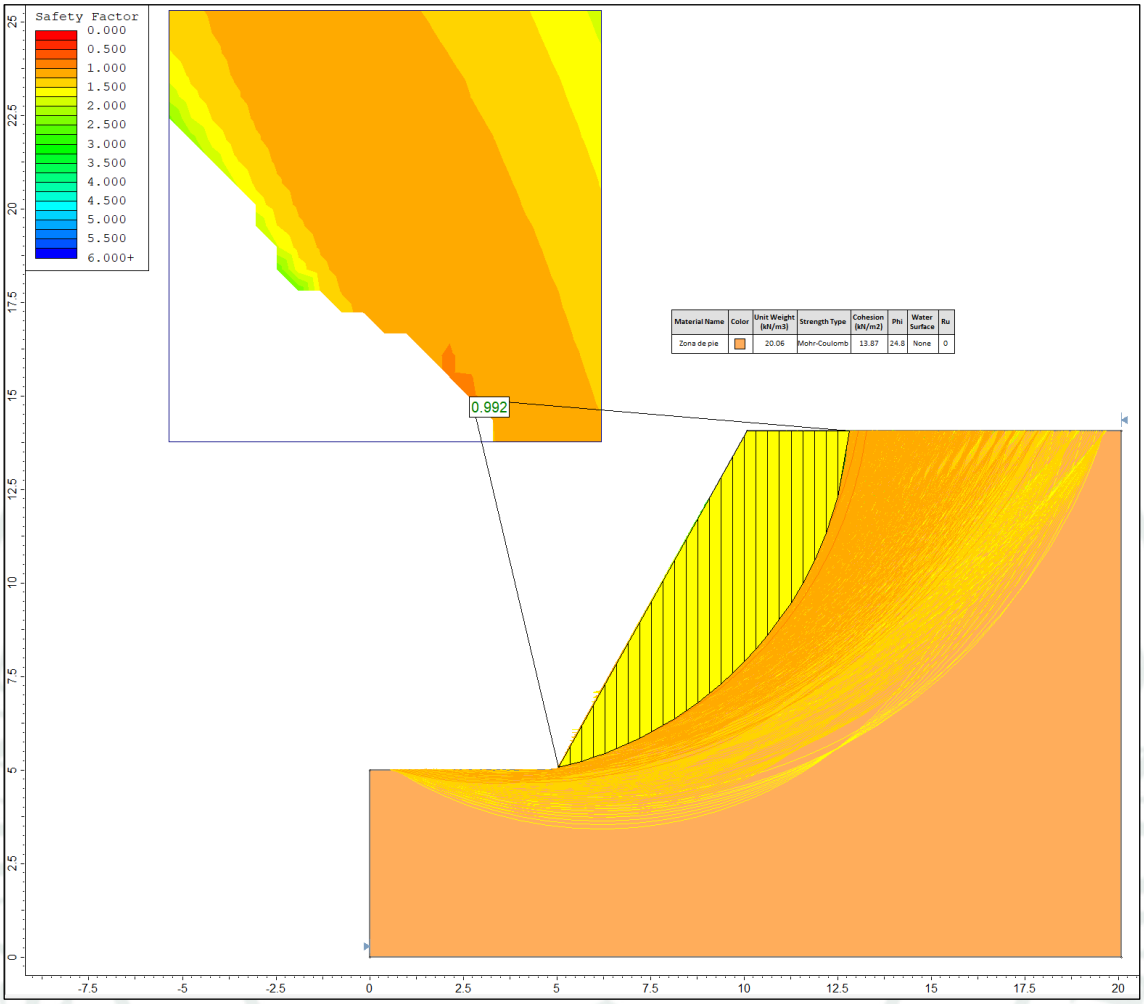


Figura A9-11. Sensibilidad del peso unitario en el pie del talud: escenario γ +20 %

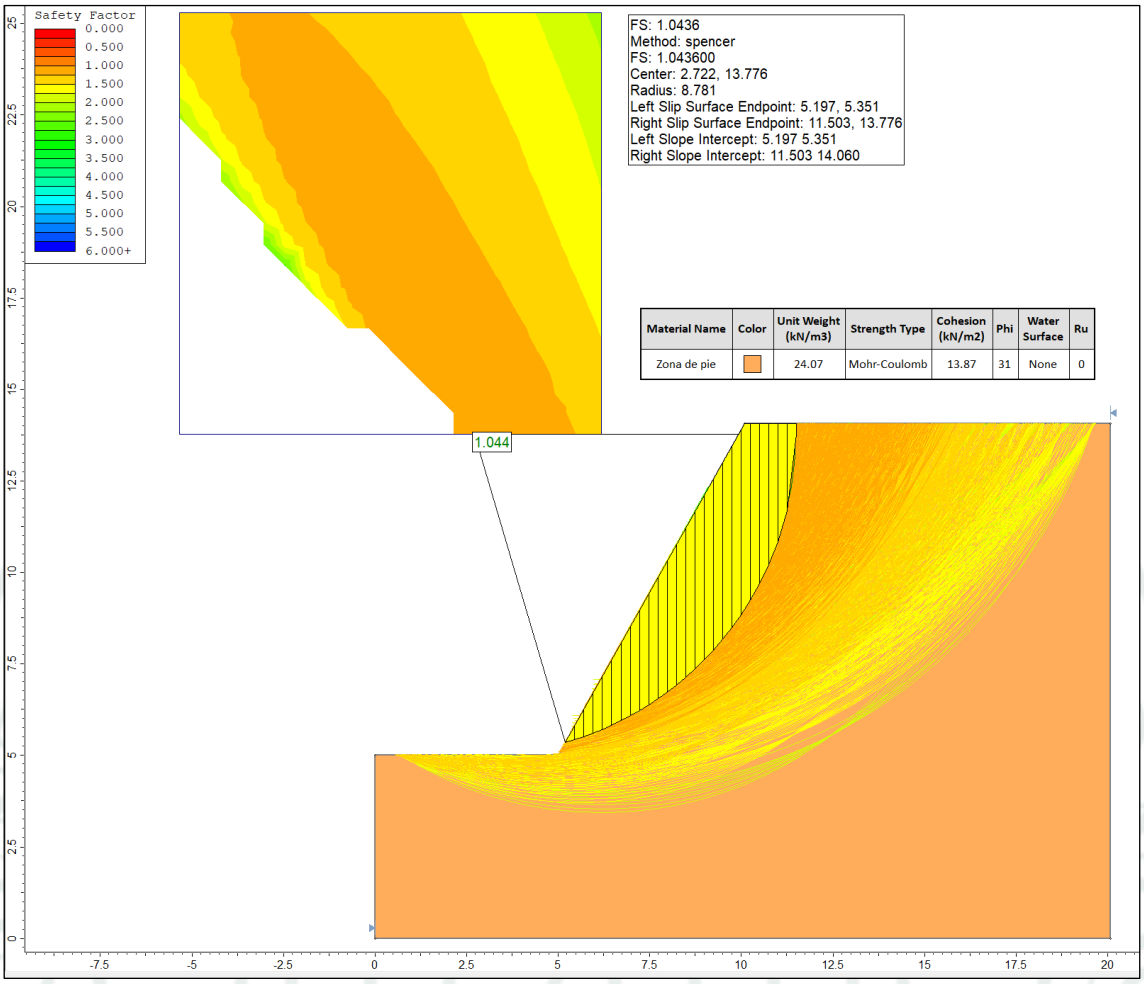
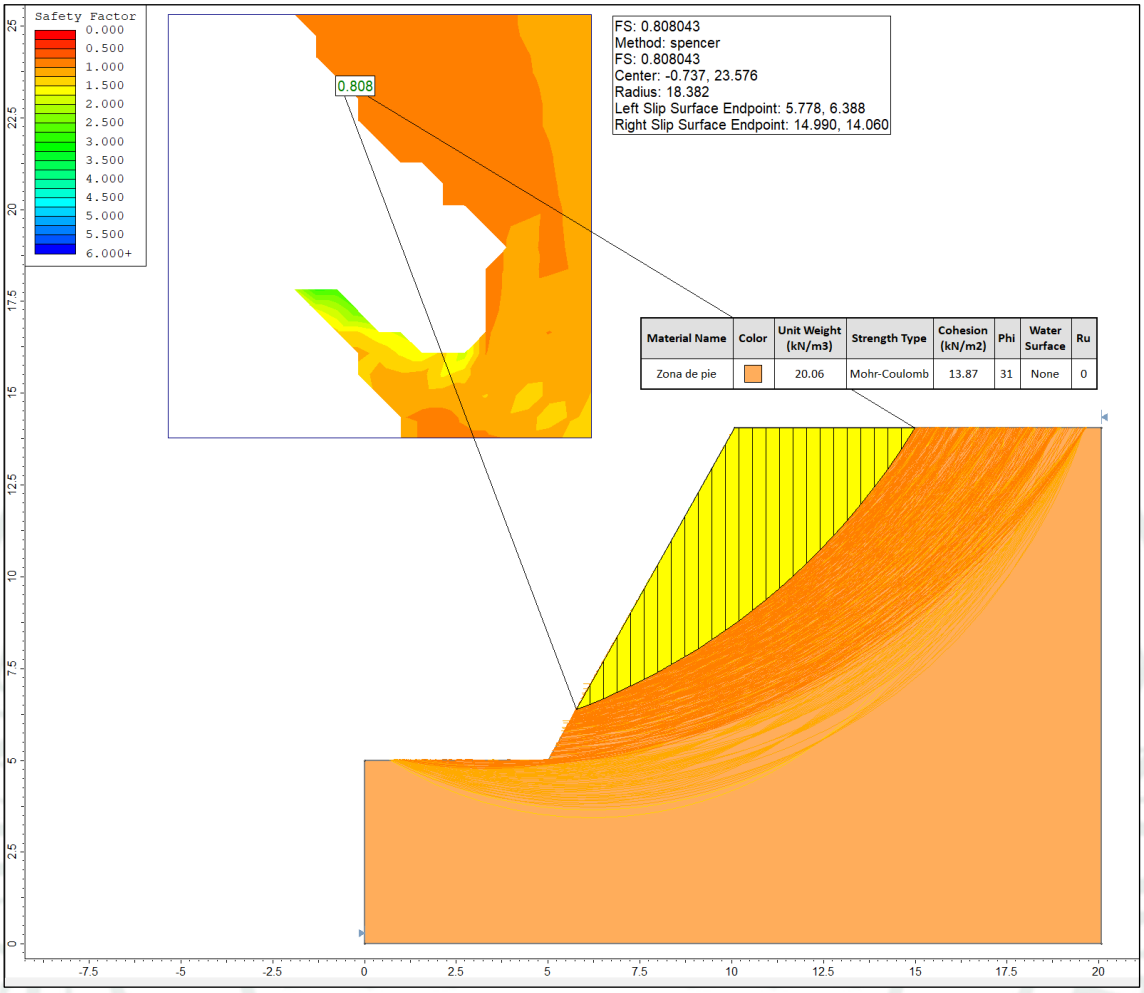


Figura A9-12. Sensibilidad del coeficiente sísmico en el pie del talud: escenario kh = 0.350



Las capturas presentadas respaldan el proceso de análisis de sensibilidad realizado en Slide V6.004. No se incluyen todas las variaciones evaluadas, debido a que los resultados completos se encuentran sistematizados en las tablas del Capítulo IV. Las imágenes incorporadas corresponden a escenarios representativos y desfavorables que permiten verificar la variación del factor de seguridad frente a los parámetros analizados.

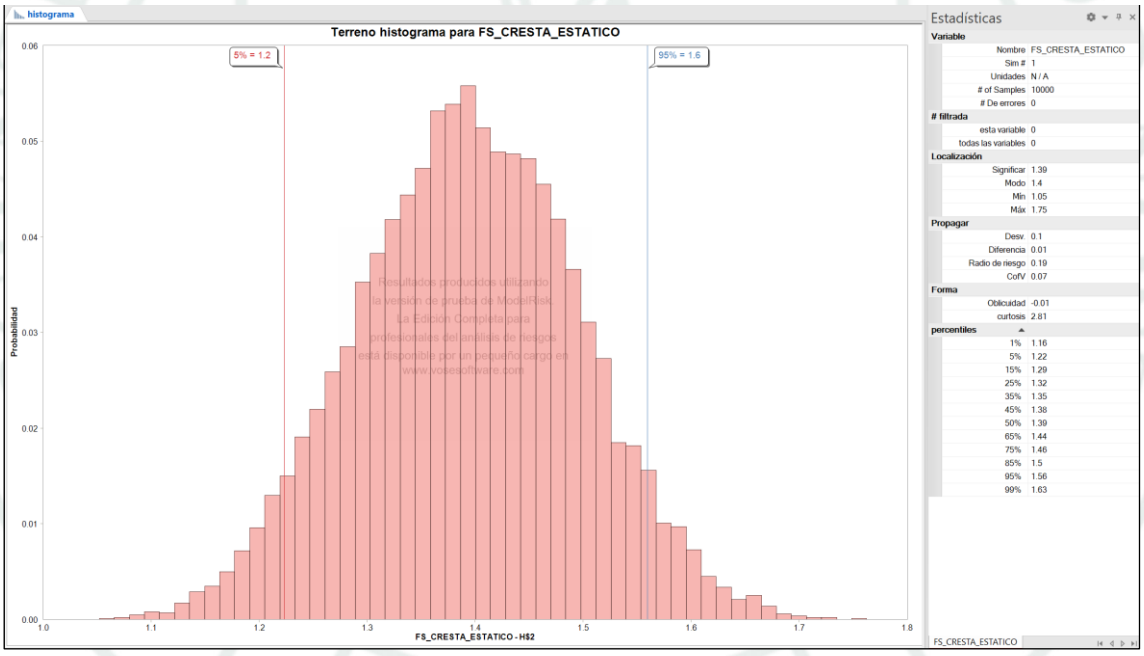
ANEXO 10. Resultados de simulación Monte Carlo en condición estática

El presente anexo muestra los resultados gráficos de la simulación Monte Carlo desarrollada en condición estática mediante el software ModelRisk. La simulación permitió evaluar la variabilidad del factor de seguridad considerando la variación simultánea de los parámetros geotécnicos representativos del talud.

Para este escenario no se incorporó acción sísmica, por lo que los resultados corresponden a la distribución simulada del factor de seguridad bajo condición estática, dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Se consideraron 10 000 iteraciones para cada sección representativa: cresta, zona media y pie del talud.

A10.1. Simulación Monte Carlo estática en la cresta del talud

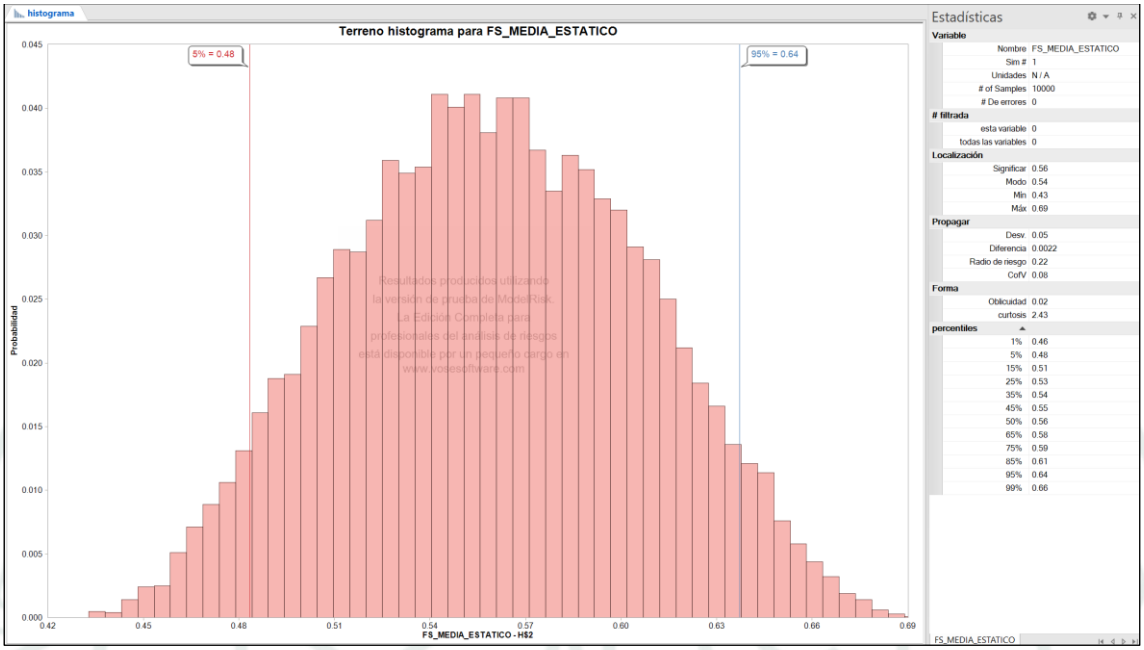
Figura A10-1. Simulación Monte Carlo en condición estática para la cresta del talud



Nota. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. La cresta presentó una media de FS = 1.39 y 0.00 % de resultados con FS<1.00; por tanto, dentro de los rangos simulados, todos los resultados permanecieron por encima del umbral mecánico de equilibrio.

A10.2. Simulación Monte Carlo estática en la zona media del talud

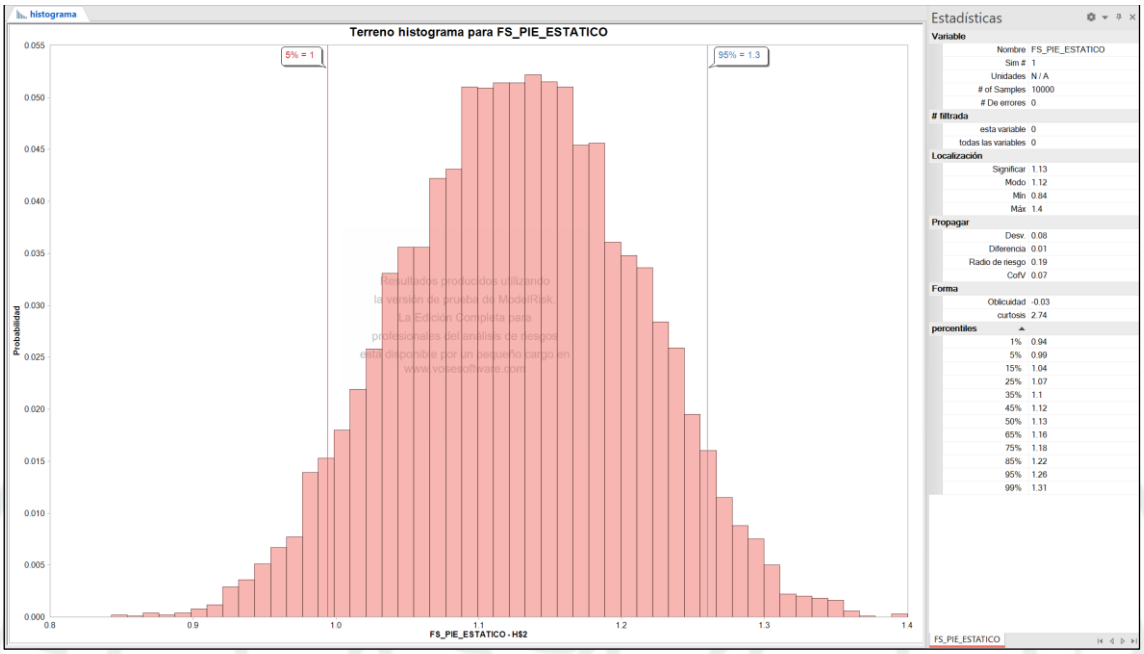
Figura A10-2. Simulación Monte Carlo en condición estática para la zona media del talud



Nota. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. La zona media presentó una media de FS = 0.56 y el 100.00 % de los resultados se ubicó por debajo de FS = 1.00, manteniéndose por debajo del umbral mecánico de equilibrio en todo el escenario simulado.

A10.3. Simulación Monte Carlo estática en el pie del talud

Figura A10-3. Simulación Monte Carlo en condición estática para el pie del talud



Nota. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. El pie del talud presentó una media de FS = 1.13 y aproximadamente 5.00 % de resultados con FS<1.00, evidenciando que una fracción de la distribución cruza el umbral mecánico de equilibrio.

Los resultados gráficos respaldan la simulación Monte Carlo estática presentada en el Capítulo IV. La cresta mostró 0.00 % de resultados con FS<1.00, la zona media 100.00 % y el pie aproximadamente 5.00 %. Estos porcentajes se interpretan como indicadores complementarios de la respuesta simulada respecto del umbral mecánico FS = 1.00 y no como una declaración independiente de cumplimiento normativo.

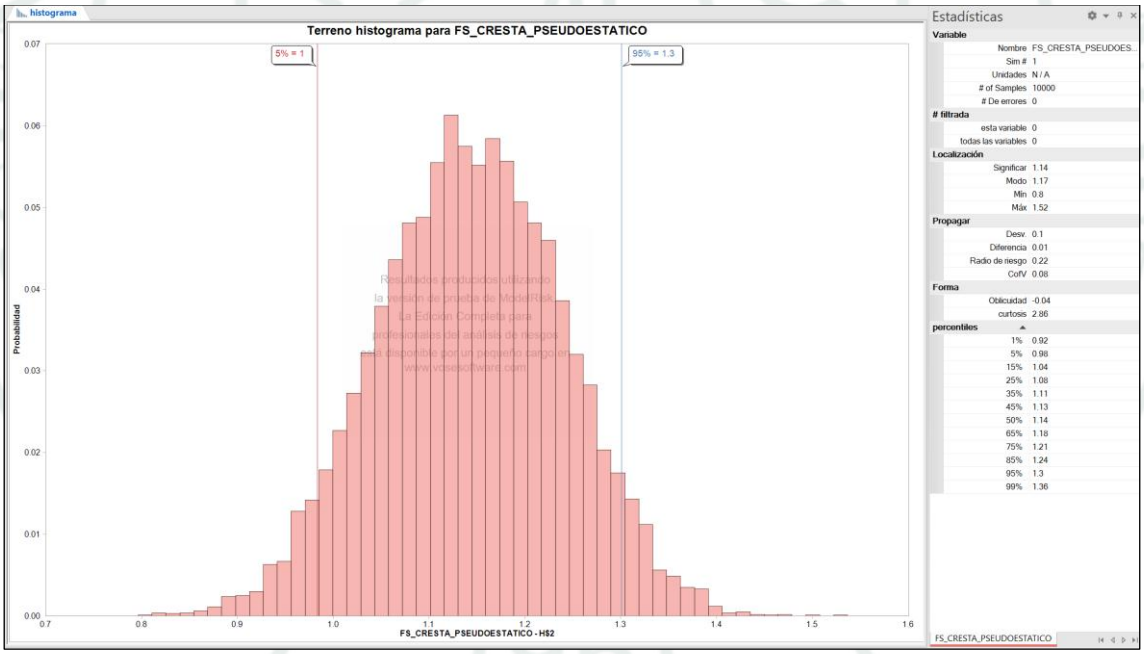
ANEXO 11. Resultados de simulación Monte Carlo en condición pseudoestática

El presente anexo muestra los resultados gráficos de la simulación Monte Carlo desarrollada en condición pseudoestática mediante el software ModelRisk. La simulación permitió evaluar la variabilidad del factor de seguridad considerando la variación simultánea de la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y el coeficiente sísmico horizontal kh.

Los parámetros de entrada fueron representados mediante distribuciones VosePERT. Para el coeficiente sísmico horizontal $k_h$se consideró un valor mínimo de 0.000, un valor más probable de 0.175 y un valor máximo de 0.350. El coeficiente sísmico vertical $k_v$se mantuvo fijo en 0.00. Se desarrollaron 10 000 iteraciones para cada sección representativa: cresta, zona media y pie del talud.

A11.1. Simulación Monte Carlo pseudoestática en la cresta del talud

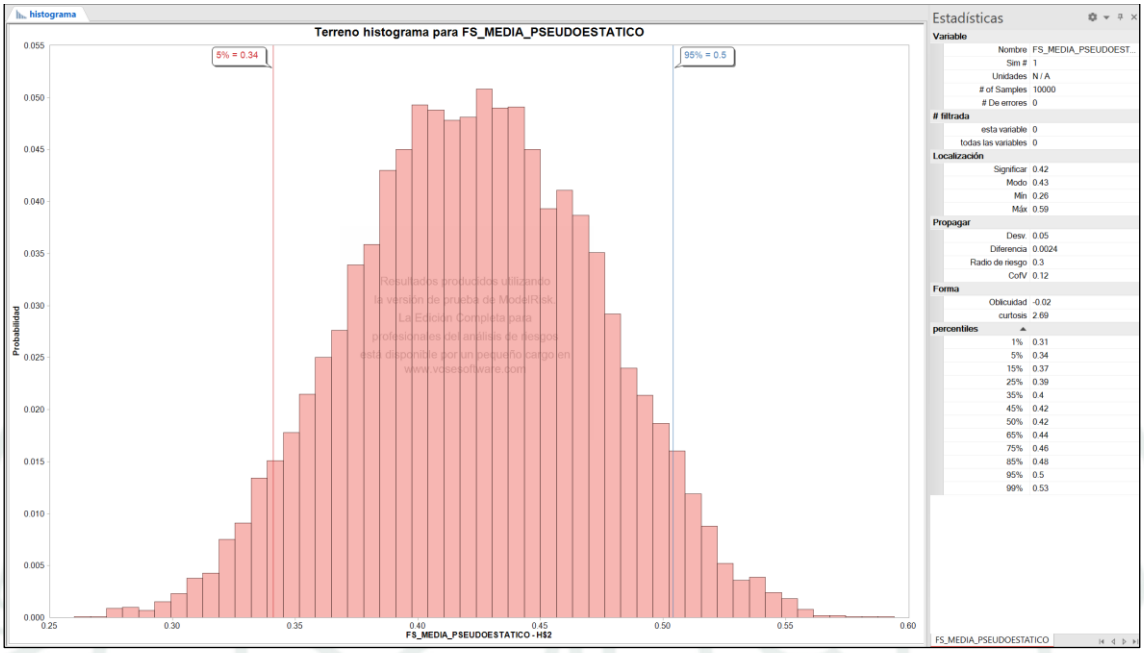
Figura A11-1. Simulación Monte Carlo en condición pseudoestática para la cresta del talud



Nota. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. La cresta presentó una media de FS = 1.14 y aproximadamente 8.00 % de resultados con FS<1.00, mostrando una fracción de escenarios por debajo del umbral mecánico de equilibrio.

A11.2. Simulación Monte Carlo pseudoestática en la zona media del talud

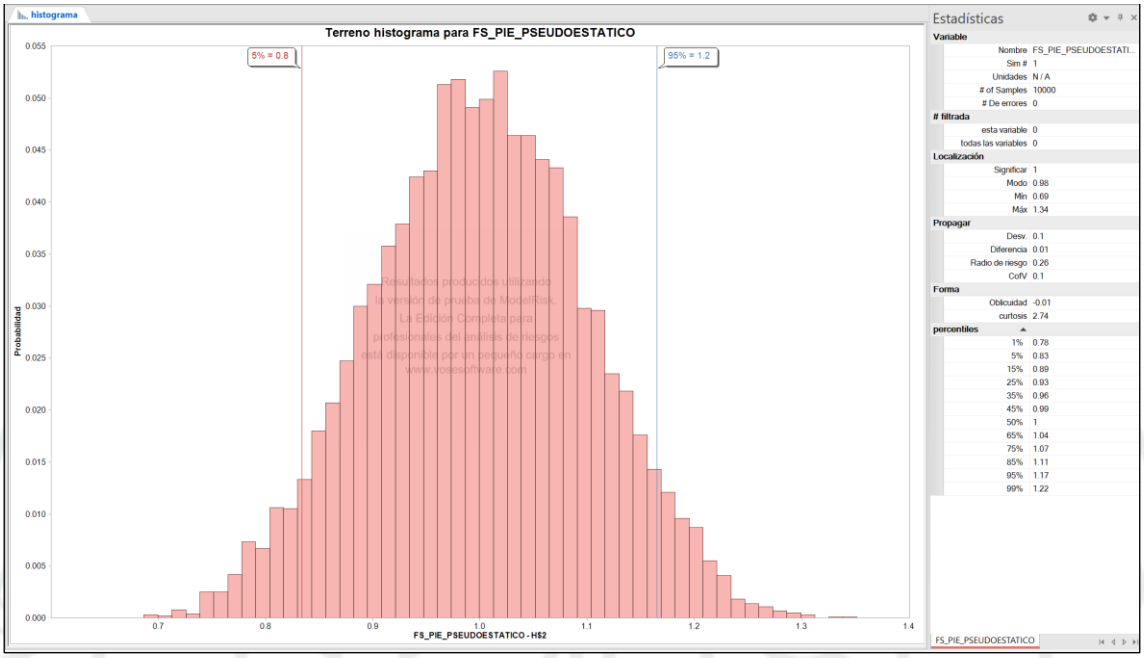
Figura A11-2. Simulación Monte Carlo en condición pseudoestática para la zona media del talud



Nota. Elaboración propia. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. La zona media presentó una media de FS = 0.42 y el 100.00 % de los resultados con FS<1.00, manteniéndose por debajo del umbral mecánico de equilibrio en todo el escenario simulado.

A11.3. Simulación Monte Carlo pseudoestática en el pie del talud

Figura A11-3. Simulación Monte Carlo en condición pseudoestática para el pie del talud



Nota. Resultado obtenido mediante ModelRisk considerando 10 000 simulaciones. El pie del talud presentó una media de FS = 1.00 y aproximadamente 50.00 % de resultados con FS<1.00, evidenciando una distribución centrada alrededor del umbral mecánico de equilibrio.

Los resultados gráficos respaldan la simulación Monte Carlo pseudoestática presentada en el Capítulo IV. La proporción de resultados con FS<1.00 fue aproximadamente 8.00 % en la cresta, 100.00 % en la zona media y 50.00 % en el pie del talud. Estas proporciones complementan la interpretación del escenario pseudoestático y deben leerse junto con el análisis determinístico, el análisis de sensibilidad y el criterio técnico adoptado para evaluar los factores de seguridad.

ANEXO 12. Registro fotográfico de ensayos de laboratorio

El presente anexo muestra el registro fotográfico de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas durante la exploración geotécnica del área de estudio. Las fotografías evidencian las etapas de preparación, secado, pesado, tamizado y ejecución de los ensayos empleados para determinar las propiedades físicas, de clasificación, hidráulicas y mecánicas del suelo.

Las imágenes se organizan por procedimiento, con la finalidad de mostrar de manera ordenada las actividades desarrolladas durante el procesamiento de las muestras. Este registro complementa los resultados presentados en el Capítulo IV y las fichas de cálculo incluidas en los anexos correspondientes.

A12.1. Determinación del contenido de humedad y secado de muestras

El procedimiento de determinación del contenido de humedad se desarrolló en dos etapas. En la primera etapa se realizó la selección, identificación y pesado inicial de las muestras en estado natural. Posteriormente, las muestras fueron colocadas en horno para su secado. En la segunda etapa se retiraron las muestras secas del horno y se procedió al pesado final, con la finalidad de determinar la pérdida de humedad del material.

A12.1.1. Parte 1: pesado inicial y colocación de muestras en horno



Foto 1: selección o identificación de muestras



Foto 2: pesado inicial



Foto 3: registro de muestras



Foto 4: colocación en horno

Nota. Registro fotográfico del pesado inicial de las muestras en estado natural y su posterior colocación en horno para el proceso de secado. Elaboración propia.

A12.1.2. Parte 2: retiro del horno y pesado de muestras secas



Foto 1: retiro de muestras del horno



Foto 2: muestras secas



Foto 3: preparación para el pesado de muestra seca



Foto 4: registro del peso seco

Nota. Proceso de secado de muestras de suelo previo a la determinación del contenido de humedad y al acondicionamiento del material para los ensayos de laboratorio. Elaboración propia.

A12.2. Ensayo granulométrico por tamizado

El ensayo granulométrico por tamizado se realizó con la finalidad de determinar la distribución de tamaños de partículas presentes en las muestras de suelo. Este procedimiento permitió separar el material en diferentes fracciones granulométricas y obtener información necesaria para la clasificación del suelo mediante el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

El procedimiento incluyó la preparación de la muestra seca, la selección y ordenamiento de tamices, el tamizado del material y el pesado de las fracciones retenidas en cada tamiz.



Foto 1: muestra seca preparada para tamizado



Foto 2: tamices ordenados



Foto 3: proceso de tamizado



Foto 4: material retenido en tamices



Foto 5: pesado de fracciones retenidas



Foto 6: registro de datos granulométricos

Nota. Registro fotográfico del ensayo granulométrico por tamizado, empleado para determinar la

distribución de tamaños de partículas y respaldar la clasificación granulométrica de las muestras evaluadas.

A12.3. Ensayo de límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg se realizó con la finalidad de evaluar el comportamiento plástico de los finos presentes en las muestras de suelo. Este procedimiento permitió determinar el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, parámetros empleados como parte de la caracterización geotécnica y clasificación del material.

El procedimiento incluyó la preparación de la muestra fina, el acondicionamiento con agua, la ejecución del ensayo de límite líquido, la formación de rollos para el límite plástico y el registro de los pesos correspondientes para el cálculo de humedad.



Foto 1: preparación de muestra fina


Foto 2: mezcla y acondicionamiento con agua


Foto 3: ensayo de límite líquido


Foto 4: muestra en copa de Casagrande


Foto 5: formación de rollos para límite plástico



Foto 6: pesado o registro de muestras

Nota. Registro fotográfico del ensayo de límites de Atterberg, empleado para evaluar el comportamiento

plástico de los finos presentes en las muestras analizadas. Elaboración propia.

A12.4. Ensayo de gravedad específica

El ensayo de gravedad específica se realizó con la finalidad de determinar la relación entre la masa de los sólidos del suelo y la masa de un volumen equivalente de agua. Este parámetro permitió complementar la caracterización física de las muestras evaluadas y fue empleado como información de respaldo para la interpretación geotécnica del material.

El procedimiento incluyó la preparación de la muestra, el pesado del material, el uso del picnómetro o recipiente de ensayo, la incorporación de agua y el registro de masas necesarias para el cálculo de la gravedad específica.



Foto 1: preparación de muestra

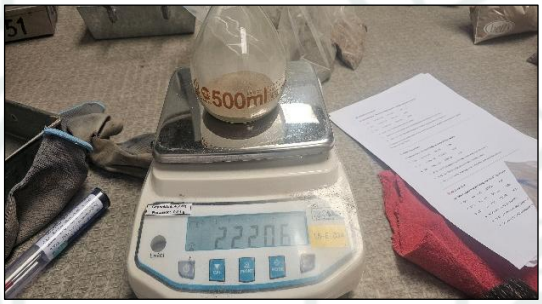


Foto 2: pesado de muestra seca



Foto 3: uso de picnómetro o recipiente

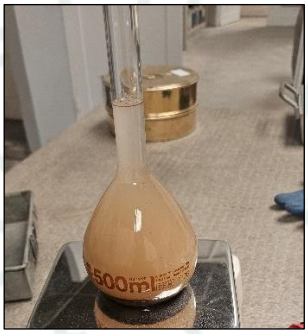


Foto 4: incorporación de agua



Foto 5: pesado del conjunto



Foto 6: registro del procedimiento

Nota. Registro fotográfico del ensayo de gravedad específica, empleado para complementar la

caracterización física de los sólidos presentes en las muestras de suelo. Elaboración propia.

A12.5. Ensayo de densidad máxima y mínima

El ensayo de densidad máxima y mínima se realizó con la finalidad de complementar la caracterización física de los materiales granulares presentes en las muestras de suelo. Este procedimiento permitió obtener valores de referencia relacionados con el estado de acomodo del material, considerando condiciones sueltas y compactadas. El procedimiento incluyó la preparación del material seco, el llenado del recipiente de volumen conocido, el pesado del material en condición suelta, la compactación o acomodo del suelo y el registro de las masas correspondientes para el cálculo de la densidad mínima y máxima.



Foto 1: preparación del material seco



Foto 2: recipiente de volumen conocido



Foto 3: llenado del recipiente en condición suelta



Foto 4: pesado del material



Foto 5: acomodo o compactación del material



Foto 6: registro del peso final

Nota. Registro fotográfico del ensayo de densidad máxima y mínima, empleado para complementar la

caracterización física de los materiales granulares presentes en las muestras evaluadas. Elaboración propia.

A12.6. Ensayo de permeabilidad

El ensayo de permeabilidad se realizó con la finalidad de evaluar la capacidad de flujo del agua a través de las muestras de suelo seleccionadas. Este procedimiento permitió obtener el coeficiente de permeabilidad como parámetro complementario para la caracterización geotécnica del material.

El procedimiento incluyó la preparación de la muestra, colocación del material en el equipo de ensayo, saturación o acondicionamiento del suelo, circulación de agua y registro del volumen o tiempo requerido para el cálculo del coeficiente de permeabilidad.



Foto 1: preparación y pesado del equipo



Foto 2: colocación del material en el equipo



Foto 3: Toma de temperatura para ensayo



Foto 4: circulación de agua durante el ensayo



Foto 5: muestra saturada



Foto 6: medición de volumen o tiempo

A12.7. Ensayo de corte directo

El ensayo de corte directo se realizó con la finalidad de determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo, específicamente la cohesión y el ángulo de fricción interna. Estos parámetros fueron empleados posteriormente en el modelamiento bidimensional de estabilidad mediante Slide V6.004.

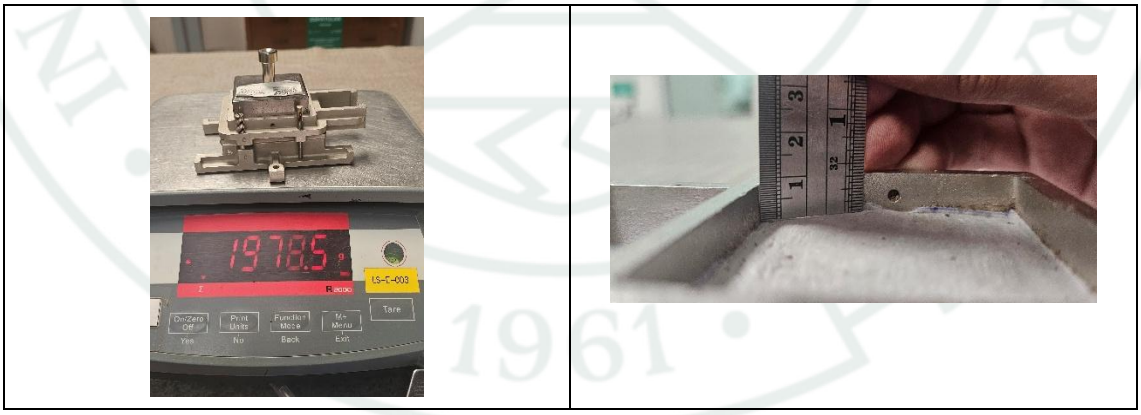
El procedimiento comprendió la preparación de la muestra, colocación del material en la caja de corte, montaje del equipo, aplicación de cargas normales, ejecución del desplazamiento horizontal y registro de la resistencia al corte.

A12.7.1. Preparación de muestras para corte directo



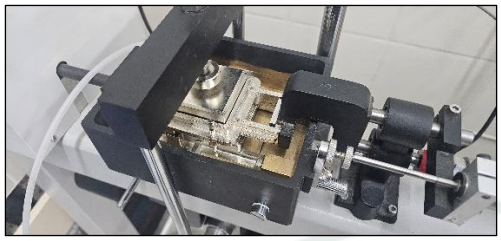
Nota. Preparación del material seleccionado para el ensayo de corte directo. Esta etapa permitió acondicionar la muestra antes de su colocación en la caja de corte. Elaboración propia.

A12.7.2. Colocación de la muestra en la caja de corte



Nota. Colocación y acomodación del suelo dentro de la caja de corte, procurando mantener condiciones representativas del material evaluado. Elaboración propia.

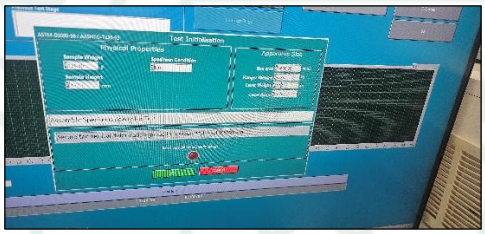
A12.7.3. Montaje del equipo y aplicación de carga normal





Nota. Montaje de la caja de corte en el equipo y aplicación de la carga normal correspondiente para el desarrollo del ensayo. Elaboración propia.

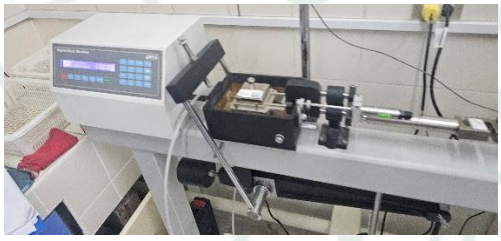
A12.7.4. Ejecución del corte y registro de datos

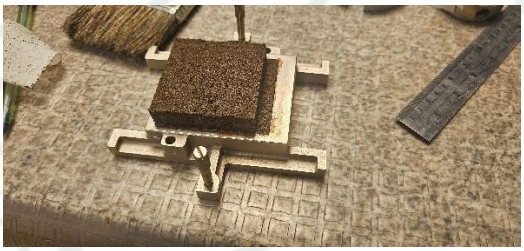




Nota. Ejecución del desplazamiento horizontal durante el ensayo de corte directo y registro de los datos necesarios para determinar la resistencia al corte del suelo. Elaboración propia.

A12.7.5. Muestra posterior al ensayo





Nota. Condición de la muestra posterior al ensayo de corte directo, luego de alcanzarse la deformación correspondiente durante el proceso de corte. Elaboración propia.

ANEXO 13. Cálculo geométrico de la profundidad aproximada de las superficies críticas

El presente anexo desarrolla el procedimiento geométrico utilizado para estimar la profundidad vertical máxima aproximada de las superficies críticas obtenidas mediante Slide V6.004 para las tres secciones representativas del talud, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Los datos geométricos de cada superficie crítica fueron tomados de los resultados Global Minimum correspondientes al método de Spencer.

Los cálculos se emplean únicamente para comparar el alcance de las superficies potenciales de falla con las profundidades de exploración ejecutadas mediante calicatas. En consecuencia, los valores obtenidos no corresponden a profundidades medidas directamente en campo, sino a estimaciones geométricas derivadas de los modelos bidimensionales.

A13.1. Criterio de cálculo

El contorno exterior del modelo presenta un pie del talud en la coordenada aproximada (5.00; 5.00) y una cresta en (10.08; 14.06). Por tanto, la cara inclinada del talud posee una pendiente geométrica m = 9.06/5.08 = 1.7835. Para las coordenadas comprendidas entre x = 5.00 m y x = 10.08 m, la elevación del terreno se representa mediante la siguiente expresión:

$$y_t(x) = 5.00 + 1.7835\,(x - 5.00)$$

A partir de la cresta, para x ≥ 10.08 m, la superficie del terreno se mantiene horizontal en y_t = 14.06 m. La superficie crítica circular reportada por Slide V6.004 queda definida por las coordenadas de su centro (x_c, y_c) y su radio R:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = R^2$$

Para obtener la rama inferior de la superficie circular, correspondiente al arco de deslizamiento que atraviesa el terreno, se despejó la coordenada vertical:

$$y_f(x) = y_c - \sqrt{R^2 - (x - x_c)^2}$$

La profundidad vertical en una determinada coordenada horizontal se calculó como la diferencia entre la elevación del terreno y la elevación de la superficie crítica:

$$d(x) = y_t(x) - y_f(x)$$

Finalmente, se evaluó d(x) dentro del intervalo comprendido por los puntos de entrada y salida de cada superficie crítica y se adoptó como profundidad crítica

aproximada el valor máximo obtenido, d_max.

A13.2. Cresta - condición estática

Datos de Slide: FS = 1.392710; centro = (2.722; 16.658); R = 11.758 m.

El máximo se presenta en el quiebre de la cresta, x = 10.08 m.

$$y_t = 14.060 \text{ m}$$

$$y_f = 16.658 - \sqrt{11.758^2 - (10.080 - 2.722)^2} = 7.487 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 14.060 - 7.487 = 6.573 \text{ m} \approx 6.57 \text{ m}$$

A13.3. Cresta - condición pseudoestática

Datos de Slide: FS = 1.145080; centro = (2.722; 14.352); R = 9.581 m.

El máximo se presenta en el quiebre de la cresta, x = 10.08 m.

$$y_t = 14.060 \text{ m}$$

$$y_f = 14.352 - \sqrt{9.581^2 - (10.080 - 2.722)^2} = 8.216 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 14.060 - 8.216 = 5.844 \text{ m} \approx 5.84 \text{ m}$$

A13.4. Zona media - condición estática

Datos de Slide: FS = 0.560105; centro = (-1.313; 17.235); R = 12.264 m.

El máximo se localiza dentro de la cara inclinada del talud, en x ≈ 9.384 m.

$$y_t = 5.00 + 1.7835\,(9.384 - 5.00) = 12.819 \text{ m}$$

$$y_f = 17.235 - \sqrt{12.264^2 - \big(9.384 - (-1.313)\big)^2} = 11.237 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 12.819 - 11.237 = 1.582 \text{ m} \approx 1.58 \text{ m}$$

A13.5. Zona media - condición pseudoestática

Datos de Slide: FS = 0.422692; centro = (-1.313; 17.235); R = 12.264 m.

La geometría de la superficie crítica coincide con la condición estática; por ello, la profundidad aproximada es la misma.

$$y_t = 5.00 + 1.7835\,(9.384 - 5.00) = 12.819 \text{ m}$$

$$y_f = 17.235 - \sqrt{12.264^2 - \big(9.384 - (-1.313)\big)^2} = 11.237 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 12.819 - 11.237 = 1.582 \text{ m} \approx 1.58 \text{ m}$$

A13.6. Pie - condición estática

Datos de Slide: FS = 1.129220; centro = (2.722; 13.776); R = 9.043 m.

El máximo se presenta en el quiebre de la cresta, x = 10.08 m.

$$y_t = 14.060 \text{ m}$$

$$y_f = 13.776 - \sqrt{9.043^2 - (10.080 - 2.722)^2} = 8.519 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 14.060 - 8.519 = 5.541 \text{ m} \approx 5.54 \text{ m}$$

A13.7. Pie - condición pseudoestática

Datos de Slide: FS = 0.999749; centro = (1.569; 14.352); R = 9.387 m.

El máximo se localiza dentro de la cara inclinada del talud, en x ≈ 9.757 m.

$$y_t = 5.00 + 1.7835\,(9.757 - 5.00) = 13.483 \text{ m}$$

$$y_f = 14.352 - \sqrt{9.387^2 - (9.757 - 1.569)^2} = 9.761 \text{ m}$$

$$d_{\max} = 13.483 - 9.761 = 3.722 \text{ m} \approx 3.72 \text{ m}$$

A13.8. Resumen de resultados

Tabla A13-1

Comparación entre la profundidad de exploración y la profundidad aproximada de las superficies críticas

Sección	Condición	FS	Prof. exploración (m)	Prof. crítica aprox. (m)
Cresta	Estática	1.393	1.50	6.57
Cresta	Pseudoestática	1.145	1.50	5.84
Zona media	Estática	0.560	1.50	1.58
Zona media	Pseudoestática	0.423	1.50	1.58
Pie	Estática	1.129	1.00	5.54
Pie	Pseudoestática	1.000	1.00	3.72

Nota. La profundidad crítica corresponde a la máxima separación vertical aproximada entre la superficie del terreno y la superficie circular crítica obtenida mediante Slide V6.004. Los valores se determinaron geométricamente a partir del centro, radio y coordenadas del modelo reportados por el software; no corresponden a profundidades medidas directamente en campo.

Los resultados muestran que las superficies críticas alcanzan profundidades superiores a las investigadas directamente mediante calicatas, especialmente en las secciones de cresta y pie. En la zona media, la profundidad crítica aproximada de 1.58 m es ligeramente superior a la exploración de 1.50 m. Esta comparación sustenta la limitación asociada a la ausencia de exploración geotécnica profunda.

ANEXO 14. Cálculo de indicadores descriptivos, ajuste lineal y correlación de Spearman para el análisis de respuesta paramétrica de las hipótesis específicas 4 y 5

El presente anexo desarrolla los cálculos utilizados para describir cuantitativamente la respuesta del factor de seguridad frente a las modificaciones controladas de los parámetros consideradas en el análisis de sensibilidad. Para la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario se emplearon cinco niveles correspondientes a −20 %, −10 %, valor base, +10 % y +20 %; para el coeficiente sísmico horizontal kh se utilizaron los niveles 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500.

El análisis integra indicadores de magnitud y tendencia. La respuesta del factor de seguridad se cuantifica mediante FSmín, FSmáx, ΔFS y ARFS; el ajuste lineal se describe mediante la pendiente β1 y el coeficiente de determinación R^2; y el coeficiente de correlación por rangos de Spearman (ρs) se utiliza como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica del ordenamiento de los cinco escenarios. Debido a que dichos escenarios fueron generados determinísticamente y no corresponden a observaciones geotécnicas independientes, estos indicadores no se emplean para realizar inferencia estadística sobre la población de taludes ni para demostrar causalidad poblacional.

A14.1. Estructura del análisis descriptivo

Para cada relación parámetro-FS se utilizaron cinco pares ordenados. En la hipótesis específica 4 se analizaron c, φ y γ bajo condición estática en las secciones de cresta, zona media y pie del talud, obteniéndose nueve relaciones. En la hipótesis específica 5 se analizaron c, φ, γ y kh bajo condición pseudoestática en las mismas tres secciones, obteniéndose doce relaciones.

La magnitud de la respuesta se expresa mediante ΔFS y ARFS. La pendiente β1 y el coeficiente R^2 describen la dirección y el ajuste lineal observado dentro de los cinco escenarios, mientras que el coeficiente de Spearman ρs describe la dirección y consistencia del ordenamiento monotónico. Debido al origen determinístico de los escenarios, estos indicadores tienen alcance descriptivo y se interpretan únicamente dentro de los rangos de sensibilidad evaluados.

A14.2. Datos empleados en la contrastación

Los factores de seguridad empleados provienen de las tablas del análisis de

sensibilidad del Capítulo IV. A continuación, se reproducen de manera compacta para asegurar la trazabilidad de todos los cálculos desarrollados en este anexo.

Tabla A14.1.

Factores de seguridad utilizados para la hipótesis específica 4 - condición estática

Sección	Parámetro	-20 %	-10 %	Base	+10 %	+20 %
Cresta	c	1.228	1.312	1.393	1.469	1.553
Cresta	φ	1.264	1.320	1.393	1.463	1.532
Cresta	γ	1.591	1.477	1.393	1.315	1.252
Zona media	c	0.536	0.549	0.560	0.570	0.579
Zona media	φ	0.450	0.505	0.560	0.620	0.688
Zona media	γ	0.584	0.571	0.560	0.549	0.540
Pie del talud	c	1.029	1.070	1.129	1.184	1.238
Pie del talud	φ	0.992	1.059	1.129	1.201	1.295
Pie del talud	γ	1.264	1.191	1.129	1.073	1.044

Nota. Valores obtenidos del análisis de sensibilidad bajo condición estática. Cada fila corresponde a la variación individual de un parámetro, manteniendo constantes los demás valores del modelo.

Tabla A14.2.

Factores de seguridad utilizados para la hipótesis específica 5 - condición pseudoestática

Sección	Parámetro	Nivel 1	Nivel 2	Base	Nivel 4	Nivel 5
Cresta	c	1.008	1.076	1.145	1.195	1.261
Cresta	φ	1.015	1.074	1.145	1.198	1.262
Cresta	γ	1.280	1.200	1.145	1.083	1.023
Cresta	kh	1.393	1.234	1.145	1.043	1.016
Zona media	c	0.402	0.416	0.423	0.433	0.442
Zona media	φ	0.346	0.383	0.423	0.465	0.510
Zona media	γ	0.449	0.434	0.423	0.416	0.407
Zona media	kh	0.560	0.488	0.423	0.371	0.325
Pie del talud	c	0.920	0.973	1.000	1.035	1.059
Pie del talud	φ	0.835	0.903	1.000	1.101	1.158
Pie del talud	γ	1.059	1.040	1.000	0.941	0.937

Sección	Parámetro	Nivel 1	Nivel 2	Base	Nivel 4	Nivel 5
Pie del talud	kh	1.129	1.027	1.000	0.915	0.808

Nota. Para c, φ y γ los niveles corresponden a -20 %, -10 %, valor base, +10 % y +20 %. Para kh corresponden a 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500, respectivamente.

A14.3. Cálculo de la amplitud absoluta y relativa del factor de seguridad

Para cuantificar cuánto cambia el factor de seguridad dentro del rango evaluado se determinaron el valor mínimo y máximo de cada serie y, a partir de ellos, la amplitud absoluta ΔFS. Posteriormente, la amplitud se expresó con relación al factor de seguridad del escenario base mediante ARFS.

$$FS_{mín} = mín(FS_1, FS_2, \ldots, FS_5)$$

$$FS_{máx} = máx(FS_1, FS_2, \ldots, FS_5)$$

$$\Delta FS = FS_{máx} - FS_{mín}$$

$$AR_{FS} = \frac{\Delta FS}{FS_{base}} \times 100$$

Donde:

• FSmín = menor factor de seguridad obtenido dentro de los cinco escenarios.

• FSmáx = mayor factor de seguridad obtenido dentro de los cinco escenarios.

• ΔFS = amplitud absoluta de la respuesta del factor de seguridad.

• ARFS = amplitud relativa de la respuesta respecto al FS del escenario base, expresada en porcentaje.

A14.3.1. Ejemplo desarrollado: cohesión en la cresta, condición estática

Para la cohesión en la cresta, los factores de seguridad fueron 1.228, 1.312, 1.393, 1.469 y 1.553. El escenario base corresponde a FSbase = 1.393. Por tanto:

$$FSmín = 1.228$$

$$FSmáx = 1.553$$

$$\Delta FS = 1.553 - 1.228 = 0.325$$

$$AR_{FS} = \frac{0.325}{1.393} \times 100 = 23.3309\,\% \approx 23.33\,\%$$

En consecuencia, dentro del rango de variación evaluado para la cohesión, el factor de seguridad estático de la cresta presenta una amplitud absoluta de 0.325 y una amplitud relativa de 23.33 % respecto al escenario base.

A14.3.2. Ejemplo desarrollado: kh en la zona media, condición pseudoestática

Para el coeficiente sísmico horizontal kh en la zona media se obtuvieron FS = 0.560, 0.488, 0.423, 0.371 y 0.325 para kh = 0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500, respectivamente. El escenario base corresponde a kh = 0.1750 y FSbase = 0.423.

$$FSmín = 0.325$$

$$FSmáx = 0.560$$

$$\Delta FS = 0.560 - 0.325 = 0.235$$

$$AR_{FS} = \frac{0.235}{0.423} \times 100 = 55.5556\,\% \approx 55.56\,\%$$

Este resultado muestra que kh produjo la mayor amplitud relativa observada en la zona media bajo condición pseudoestática, alcanzando 55.56 % respecto al factor de seguridad base.

A14.4. Ajuste lineal descriptivo y cálculo de R²

Para representar la dirección y consistencia de la tendencia entre el parámetro modificado y el factor de seguridad se efectuó un ajuste lineal descriptivo. Para c, φ y γ se utilizó como variable X el nivel porcentual de variación (-20, -10, 0, +10 y +20). Para kh se empleó directamente el valor del coeficiente sísmico (0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625 y 0.3500).

$$\beta_1 = \frac{\Sigma(x_i - \bar{x})(FS_i - FS)}{\Sigma(x_i - \bar{x})^2}$$

$$\beta_0 = FS - \beta_1 \bar{x}$$

$$FS_{ajustado} = \beta_0 + \beta_1 x$$

$$R^2 = 1 - \frac{\Sigma\left(FS_i - FS_{ajustado,i}\right)^2}{\Sigma(FS_i - FS)^2}$$

Donde:

β_1= pendiente de la recta de ajuste;

β_0= intercepto u ordenada al origen de la recta de ajuste;

x_i= valor del nivel del parámetro correspondiente al escenario i;

$\bar{x}$= promedio de los valores de x;

FS_i= factor de seguridad observado en el escenario i;

$\bar{FS}$= promedio de los factores de seguridad observados;

$FS_{ajustado,i}$= factor de seguridad estimado mediante la recta de ajuste

La pendiente β1 indica la dirección del cambio del FS: un valor positivo corresponde a una tendencia creciente y un valor negativo a una tendencia decreciente. R² cuantifica descriptivamente qué tan próxima es la serie observada a una tendencia

lineal dentro de los cinco escenarios. No se emplea como prueba de causalidad poblacional.

A14.4.1. Cálculo desarrollado de R²: cohesión en la cresta, condición estática

Para este ejemplo se consideran X = {-20, -10, 0, 10, 20} y FS = {1.228, 1.312, 1.393, 1.469, 1.553}. El promedio de X es 0 y el promedio del factor de seguridad es 1.3910.

$$\bar{x} = \frac{(-20) + (-10) + 0 + 10 + 20}{5} = 0$$

$$\bar{FS} = \frac{1.228 + 1.312 + 1.393 + 1.469 + 1.553}{5} = 1.3910$$

Denominador de la pendiente

$$D = \Sigma(x_i - \bar{x})^2$$

$$D = (-20 - 0)^2 + (-10 - 0)^2 + (0 - 0)^2 + (10 - 0)^2 + (20 - 0)^2$$

$$D = 400 + 100 + 0 + 100 + 400 = 1000$$

Numerador de la pendiente

$$N = \Sigma(x_i - \bar{x})(FS_i - FS)$$

$$N_1 = (-20)(1.228 - 1.3910) + (-10)(1.312 - 1.3910) + (0)(1.393 - 1.3910)$$

$$N_1 = 3.2600 + 0.7900 + 0.0000 = 4.0500$$

$$N_2 = (10)(1.469 - 1.3910) + (20)(1.553 - 1.3910)$$

$$N_2 = 0.7800 + 3.2400 = 4.0200$$

$$N = N_1 + N_2 = 4.0500 + 4.0200 = 8.0700$$

Pendiente resultante

$$\beta_1 = \frac{8.0700}{1000} = 0.00807$$

$$\beta_0 = 1.3910 - (0.00807)(0) = 1.3910$$

$$FSajustado = 1.3910 + 0.00807x$$

Tabla A14.3.

Cálculo del ajuste lineal para cohesión - FS en cresta, condición estática

Nivel X	FS observado	FS ajustado	Residuo	Residuo²
-20 %	1.228	1.2296	-0.0016	0.0000026

Nivel X	FS observado	FS ajustado	Residuo	Residuo²
-10 %	1.312	1.3103	0.0017	0.0000029
Base	1.393	1.3910	0.0020	0.0000040
+10 %	1.469	1.4717	-0.0027	0.0000073
+20 %	1.553	1.5524	0.0006	0.0000004

Nota. FS ajustado se obtiene con la ecuación FS = 1.3910 + 0.00807x. El residuo corresponde a FS observado - FS ajustado.

La suma de cuadrados de los errores o residuos (SSE) cuantifica la diferencia acumulada, elevada al cuadrado, entre los factores de seguridad observados y los factores de seguridad estimados mediante la recta de ajuste:

$$SSE = \Sigma(FSi - FSajustado, i)^2 = 0.0000171$$

La suma total de cuadrados (SST) cuantifica la variabilidad total de los factores de seguridad observados respecto a su valor promedio:

$$SST = \Sigma(FSi - FS)^2$$

$$SST = (1.228 - 1.391)^2 + (1.312 - 1.391)^2 + (1.393 - 1.391)^2 + (1.469 - 1.391)^2 + (1.553 - 1.391)^2$$

$$SST = 0.0651420$$

$$R^2 = 1 - \frac{0.0000171}{0.0651420} = 0.9997375 \approx 0.9997$$

El valor $R^2 = 0.9997$ indica que, dentro de los cinco escenarios controlados de cohesión, la respuesta del factor de seguridad presenta una tendencia lineal prácticamente perfecta. Este resultado describe la consistencia de la tendencia, mientras que el coeficiente de Spearman se emplea posteriormente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica del ordenamiento de los escenarios.

A14.4.2. Ajuste lineal para kh: particularidad de la escala de análisis

En el caso de kh, la variable X no corresponde a porcentajes, sino a los valores reales del coeficiente sísmico. Por ejemplo, para la cresta se emplean X = {0.0000, 0.0875, 0.1750, 0.2625, 0.3500} y FS = {1.393, 1.234, 1.145, 1.043, 1.016}.

$$\bar{x} = 0.1750$$

$$FS = 1.1662$$

$$\beta_1 = -1.0800$$

$$\beta_0 = 1.3552$$

$$FSajustado = 1.3552 - 1.080\,(kh)$$

$$R^2 = 0.9477802 \approx 0.9478$$

La pendiente de kh está expresada en unidades de FS por unidad de kh y, por tanto, no debe compararse numéricamente de forma directa con las pendientes de c, φ y γ, cuyo eje X está expresado en puntos porcentuales. Para comparar magnitudes entre parámetros se utiliza principalmente ARFS.

A14.5. Correlación por rangos de Spearman como indicador descriptivo

El coeficiente de Spearman se empleó para describir la dirección y consistencia monotónica entre el nivel de cada parámetro y el factor de seguridad dentro de los cinco escenarios determinísticos del análisis de sensibilidad. Al no existir empates en las relaciones evaluadas, los rangos fueron asignados de 1 a 5.

$$\rho_s = 1 - \frac{6\Sigma {d_i}^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde:

ρ_s= coeficiente de correlación por rangos de Spearman.

d_i= diferencia entre los rangos.

n= número de pares, en este caso n = 5

A14.5.1. Ejemplo de asociación positiva: cohesión - FS en la cresta estática

Tabla A14.4.

Asignación de rangos para cohesión - FS en cresta, condición estática

Nivel	Rango c	FS	Rango FS	di	di²
1	1	1.228	1	0	0
2	2	1.312	2	0	0
3	3	1.393	3	0	0
4	4	1.469	4	0	0
5	5	1.553	5	0	0

Nota. Debido a que los rangos del parámetro y del FS coinciden en los cinco niveles, Σdi² = 0.

$$\Sigma di^2 = 0$$

$$\rho_s = 1 - \frac{6(0)}{5(5^2 - 1)}$$

$$\rho s = +1.000$$

El resultado ρs = +1.000 representa una asociación monotónica positiva perfecta dentro de los cinco escenarios modelados: al aumentar la cohesión, el factor de seguridad aumenta de manera ordenada.

A14.5.2. Ejemplo de asociación negativa: kh - FS en la cresta pseudoestática

Tabla A14.5.

Asignación de rangos para kh - FS en cresta, condición pseudoestática

kh	Rango kh	FS	Rango FS	di	di²
0.0000	1	1.393	5	-4	16
0.0875	2	1.234	4	-2	4
0.1750	3	1.145	3	0	0
0.2625	4	1.043	2	2	4
0.3500	5	1.016	1	4	16

Nota. La suma de cuadrados de las diferencias de rangos es $\Sigma di^2 = 40$.

$$\Sigma di^2 = 16 + 4 + 0 + 4 + 16 = 40$$

$$\rho_s = 1 - \frac{6(40)}{5(5^2 - 1)}$$

$$\rho s = 1 - 240/120 = -1.000$$

El resultado ρs = -1.000 representa una asociación monotónica negativa perfecta dentro de los cinco escenarios modelados: conforme aumenta kh, el factor de seguridad disminuye de manera ordenada.

A14.6. Resultados completos para la hipótesis específica 4 - condición estática

La Tabla A14.6 resume la magnitud de la respuesta y el ajuste lineal para las nueve relaciones de H4. La Tabla A14.7 presenta la síntesis descriptiva del ordenamiento monotónico mediante el coeficiente de Spearman.

Tabla A14.6.

Indicadores de amplitud y ajuste lineal para la hipótesis específica 4

Sección	Par.	FSmín	FSmáx	ΔFS	ARFS (%)	β1	R²
Cresta	c	1.228	1.553	0.325	23.33	0.00807	0.9997
Cresta	φ	1.264	1.532	0.268	19.24	0.00679	0.9983
Cresta	γ	1.252	1.591	0.339	24.34	-0.00840	0.9878
Zona media	c	0.536	0.579	0.043	7.68	0.00107	0.9949
Zona media	φ	0.450	0.688	0.238	42.50	0.00591	0.9979
Zona media	γ	0.540	0.584	0.044	7.86	-0.00110	0.9960
Pie del talud	c	1.029	1.238	0.209	18.51	0.00532	0.9972
Pie del talud	φ	0.992	1.295	0.303	26.84	0.00748	0.9953

Sección	Par.	FSmín	FSmáx	ΔFS	ARFS (%)	β1	R^2
Pie del talud	γ	1.044	1.264	0.220	19.49	-0.00558	0.9790

Nota. Para c, φ y γ, β1 expresa el cambio del FS por cada punto porcentual de variación del parámetro. R^2 es descriptivo y corresponde al ajuste lineal dentro de los cinco escenarios.

Tabla A14.7.

Síntesis descriptiva de Spearman para la hipótesis específica 4

Sección	Parámetro	ρs	Dirección
Cresta	c	+1.000	Positiva
Cresta	φ	+1.000	Positiva
Cresta	γ	-1.000	Negativa
Zona media	c	+1.000	Positiva
Zona media	φ	+1.000	Positiva
Zona media	γ	-1.000	Negativa
Pie del talud	c	+1.000	Positiva
Pie del talud	φ	+1.000	Positiva
Pie del talud	γ	-1.000	Negativa

Nota. El coeficiente ρs se utiliza exclusivamente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica de la respuesta dentro de los cinco escenarios determinísticos evaluados. Los resultados no representan una inferencia estadística sobre la población de taludes.

En la cresta, el peso unitario presentó la mayor amplitud de respuesta, con ΔFS = 0.339 y ARFS = 24.34 %. En la zona media, el ángulo de fricción interna presentó la mayor respuesta, con ΔFS = 0.238 y ARFS = 42.50 %. En el pie del talud, el ángulo de fricción interna alcanzó ΔFS = 0.303 y ARFS = 26.84 %. La cohesión y φ presentaron asociaciones positivas con el FS, mientras que γ presentó asociación inversa.

En conjunto, los resultados muestran que las modificaciones controladas de c, φ y γ produjeron cambios sistemáticos del factor de seguridad bajo condición estática, con magnitudes diferenciadas según la sección y el parámetro. Los valores de ρs describen el ordenamiento monotónico de estas respuestas. Por tanto, los resultados respaldan técnicamente la hipótesis específica 4 dentro de los escenarios y rangos de sensibilidad evaluados, sin que ello implique inferencia estadística sobre la variabilidad espacial de la totalidad del sector.

A14.7. Resultados completos para la hipótesis específica 5 - condición pseudoestática

La Tabla A14.8 resume la magnitud de la respuesta y el ajuste lineal para las doce relaciones de H5. En c, φ y γ se mantiene la escala porcentual del análisis de sensibilidad, mientras que para kh la pendiente se calcula utilizando los valores reales del coeficiente sísmico.

Tabla A14.8.

Indicadores de amplitud y ajuste lineal para la hipótesis específica 5

Sección	Par.	FSmín	FSmáx	ΔFS	ARFS (%)	β1	R^2
Cresta	c	1.008	1.261	0.253	22.10	0.00625	0.9974
Cresta	φ	1.015	1.262	0.247	21.57	0.00618	0.9986
Cresta	γ	1.023	1.280	0.257	22.45	-0.00631	0.9961
Cresta	kh	1.016	1.393	0.377	32.93	-1.08000	0.9478
Zona media	c	0.402	0.442	0.040	9.46	0.00097	0.9896
Zona media	φ	0.346	0.510	0.164	38.77	0.00410	0.9986
Zona media	γ	0.407	0.449	0.042	9.93	-0.00102	0.9789
Zona media	kh	0.325	0.560	0.235	55.56	-0.67086	0.9912
Pie del talud	c	0.920	1.059	0.139	13.90	0.00340	0.9796
Pie del talud	φ	0.835	1.158	0.323	32.30	0.00844	0.9922
Pie del talud	γ	0.937	1.059	0.122	12.20	-0.00343	0.9469
Pie del talud	kh	0.808	1.129	0.321	32.10	-0.86171	0.9713

Nota. Para c, φ y γ, β1 se expresa por punto porcentual. Para kh, β1 se expresa por unidad de kh; por ello, las pendientes no se comparan directamente entre escalas. ARFS se utiliza para comparar magnitudes relativas.

Tabla A14.9.

Síntesis descriptiva de Spearman para la hipótesis específica 5

Sección	Parámetro	ρs	Dirección
Cresta	c	+1.000	Positiva
Cresta	φ	+1.000	Positiva
Cresta	γ	-1.000	Negativa
Cresta	kh	-1.000	Negativa
Zona media	c	+1.000	Positiva
Zona media	φ	+1.000	Positiva
Zona media	γ	-1.000	Negativa
Zona media	kh	-1.000	Negativa
Pie del talud	c	+1.000	Positiva

Sección	Parámetro	ρs	Dirección
Pie del talud	φ	+1.000	Positiva
Pie del talud	γ	-1.000	Negativa
Pie del talud	kh	-1.000	Negativa

Nota. El coeficiente ρs se utiliza exclusivamente como indicador descriptivo de la dirección y consistencia monotónica de la respuesta dentro de los cinco escenarios determinísticos evaluados. Para c, φ y γ los escenarios corresponden a perturbaciones controladas del análisis de sensibilidad; para kh corresponden a los cinco niveles pseudoestáticos definidos. Estos resultados no constituyen inferencia poblacional.

En la cresta, kh presentó la mayor amplitud de respuesta, con ΔFS = 0.377 y ARFS = 32.93 %. En la zona media, kh produjo la mayor respuesta, con ΔFS = 0.235 y ARFS = 55.56 %. En el pie del talud, φ presentó ΔFS = 0.323 y ARFS = 32.30 %, seguido muy de cerca por kh con ΔFS = 0.321 y ARFS = 32.10 %. La cohesión y φ mostraron asociaciones directas con el FS; γ y kh mostraron asociaciones inversas.

En conjunto, los resultados muestran que las modificaciones controladas de c, φ, γ y kh produjeron cambios sistemáticos del factor de seguridad bajo condición pseudoestática, con magnitudes diferenciadas según la sección y el parámetro. Los valores de ρs describen el ordenamiento monotónico de estas respuestas. Por tanto, los resultados respaldan técnicamente la hipótesis específica 5 dentro de los escenarios y rangos modelados, sin que ello implique inferencia estadística ni caracterización probabilística de la variabilidad espacial del sector.

A14.8. Trazabilidad con las Tablas 32 y 34 y las Figuras 20 y 21

Los valores de ΔFS, ARFS, R^2 y ρs resumidos en este anexo corresponden a los indicadores descriptivos incorporados en las Tablas 32 y 34 del Capítulo IV. Los datos de origen son los mismos factores de seguridad obtenidos en las tablas de sensibilidad estática y pseudoestática. Por tanto, no se incorporan nuevos resultados de Slide; únicamente se realiza un procesamiento descriptivo complementario de resultados ya obtenidos mediante el modelamiento determinístico.

Las Figuras 20 y 21 representan gráficamente los mismos cinco escenarios utilizados en los cálculos. La Figura 20 muestra la tendencia del FS frente a c, φ y γ bajo condición estática; la Figura 21 muestra la respuesta pseudoestática frente a c, φ, γ y kh. Los valores de R^2 incluidos en dichas figuras corresponden a los ajustes lineales resumidos en las Tablas A14.6 y A14.8.

A14.9. Alcance, limitaciones y criterios de interpretación

Los cinco niveles analizados en cada relación corresponden a escenarios paramétricos controlados dentro de un modelo numérico. No constituyen cinco muestras geotécnicas independientes ni una muestra probabilística de la totalidad del barrio La Recoleta. Por ello, los coeficientes de R^2 y Spearman obtenidos se utilizan únicamente para describir la tendencia y el ordenamiento de la respuesta dentro de los escenarios modelados y no deben interpretarse como estimaciones poblacionales, demostraciones causales o pruebas inferenciales de la variabilidad espacial real del terreno.

El coeficiente de Spearman describe dirección y consistencia monotónica, pero no cuantifica por sí mismo la magnitud de la influencia. En esta investigación, todos los parámetros presentan $|\rho s| = 1.000$ debido a que sus cinco respuestas son perfectamente monotónicas, aunque sus amplitudes ΔFS y ARFS son distintas. Por ello, la magnitud de la respuesta se interpreta mediante ΔFS y ARFS, y no comparando únicamente los valores absolutos de ρs.

El coeficiente R^2 se utiliza únicamente como indicador descriptivo del ajuste lineal dentro del rango evaluado. Un R^2 elevado no implica causalidad poblacional. Asimismo, la pendiente $\beta 1$ de kh no es directamente comparable con las pendientes de c, φ y γ porque las escalas del eje X son diferentes. Para comparar la magnitud relativa entre parámetros se utiliza ARFS.

Finalmente, el análisis de sensibilidad se realizó variando un parámetro a la vez y manteniendo constantes los demás. Este procedimiento permite aislar la respuesta del modelo frente a cada variable, pero no representa de forma simultánea todas las combinaciones posibles de variabilidad geotécnica. La simulación Monte Carlo desarrollada en la investigación cumple un propósito complementario para evaluar dispersión conjunta dentro de los rangos asumidos.

Tabla A14.10.

Síntesis de la función de los indicadores descriptivos utilizados

Indicador	Función en la investigación	Uso
FSmín / FSmáx	Identificar los extremos de FS dentro de cinco escenarios	Descriptiva
ΔFS	Cuantificar la amplitud absoluta de respuesta del FS	Descriptiva
ARFS (%)	Comparar la amplitud relativa respecto al FS base	Descriptiva

Indicador	Función en la investigación	Uso
β1	Identificar la dirección y tasa lineal de cambio dentro de la escala usada	Descriptiva
R^2	Describir el grado de ajuste de la tendencia lineal	Descriptiva
ρs	Describir la dirección y consistencia del ordenamiento monotónico de la respuesta.	Descriptiva
SSE	Cuantificar el error residual entre FS observado y FS ajustado	Intermedio del ajuste lineal
SST	Cuantificar la variabilidad total del FS respecto a su promedio	Intermedio del ajuste lineal

Nota. La interpretación conjunta evita atribuir a un único indicador un alcance que no le corresponde. ΔFS y ARFS cuantifican la magnitud de la respuesta; R^2 describe el ajuste de la tendencia lineal; y Spearman describe la dirección y consistencia monotónica del ordenamiento dentro de los escenarios modelados.

ANEXO 15. Validación del modelo aproximado de respuesta empleado en la simulación Monte Carlo

El presente anexo desarrolla el procedimiento de cálculo utilizado para validar el modelo aproximado de respuesta empleado en ModelRisk. La validación compara los factores de seguridad estimados mediante la función aproximada con factores de seguridad obtenidos directamente en Slide V6.004 mediante el método de Spencer, utilizando combinaciones simultáneas de parámetros previamente consideradas dentro de los rangos del análisis de sensibilidad.

El objetivo de este desarrollo es asegurar la trazabilidad entre los resultados del análisis de sensibilidad, la función de respuesta empleada en la simulación Monte Carlo y las corridas directas de validación. Los casos adicionales no constituyen nuevos rangos de variabilidad ni una caracterización probabilística del terreno; se utilizan exclusivamente como puntos de comprobación del modelo aproximado.

A15.1. Formulación del modelo aproximado de respuesta

En cada iteración de ModelRisk, los parámetros aleatorios se generan mediante distribuciones VosePERT dentro de los valores mínimo, más probable y máximo definidos en la investigación. Para cada parámetro se determina su variación relativa respecto del valor base mediante la siguiente expresión:

$$\delta_X = \frac{X_i - X_0}{X_0}$$

Donde:

δ_X representa la variación relativa del parámetro,

X_i es el valor considerado en la iteración o caso de validación

X_0 corresponde al valor base utilizado en la función de respuesta.

Para la condición estática, el factor de seguridad aproximado se obtiene mediante una función lineal aditiva de las variaciones relativas de la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso unitario:

$$FS_{aprox} = FS_{base} + S_c\delta_c + S_\varphi\delta_\varphi + S_\gamma\delta_\gamma$$

Para la condición pseudoestática se incorpora adicionalmente el efecto del coeficiente sísmico horizontal kh:

$$FS_{aprox} = FS_{base} + S_c\delta_c + S_\varphi\delta_\varphi + S_\gamma\delta_\gamma + S_{kh}\delta_{kh}$$

En estas expresiones, FSbase corresponde al factor de seguridad del escenario base calculado directamente en Slide V6.004; Sc, Sφ, Sγ y Skh representan los coeficientes de sensibilidad utilizados por la función de respuesta.

A15.2. Obtención de los coeficientes de sensibilidad

Para c, φ y γ, los coeficientes de sensibilidad se determinaron a partir de la diferencia entre los factores de seguridad correspondientes a los extremos +20 % y -20 % del análisis de sensibilidad, dividida entre una amplitud relativa total de 0.40:

$$S_X = \frac{FS_{+20\,\%} - FS_{-20\,\%}}{0.40}$$

Para kh, el valor base pseudoestático es kh = 0.175. La variación relativa se expresa respecto de dicho valor base, mientras que el coeficiente empleado en los archivos ModelRisk corresponde a la diferencia entre el factor de seguridad del nivel kh = 0.350 y el factor de seguridad del escenario base kh = 0.175:

$$\delta_{kh} = \frac{kh_i - 0.175}{0.175}$$

$$S_{kh} = FS_{kh=0.350} - FS_{kh=0.175}$$

La Tabla A15.1 resume los factores de seguridad base y los coeficientes empleados en las seis funciones de respuesta utilizadas en la validación.

Tabla A15.1.

Coeficientes de sensibilidad empleados en las funciones aproximadas de respuesta

Zona	Condición	FS base	Sc	Sφ	Sγ	Skh
Cresta	Estática	1.393	0.8125	0.6700	-0.8475	—
Zona media	Estática	0.560	0.1075	0.5950	-0.1100	—
Pie del talud	Estática	1.129	0.5225	0.7575	-0.5500	—
Cresta	Pseudoestática	1.145	0.6325	0.6175	-0.6425	-0.1290
Zona media	Pseudoestática	0.423	0.1000	0.4100	-0.1050	-0.0980
Pie del talud	Pseudoestática	1.000	0.3475	0.8075	-0.3050	-0.1920

Nota. Los coeficientes de c, φ y γ se obtuvieron de los extremos del análisis de sensibilidad. En condición estática no se incorpora kh. Para la condición pseudoestática, Skh corresponde a la diferencia FS(kh = 0.350) - FS(kh = 0.175), coherente con la formulación utilizada en los archivos ModelRisk.

A15.3. Casos empleados para la validación directa en Slide V6.004

Se definieron tres combinaciones por sección y condición: un caso desfavorable, un caso favorable y un caso mixto. Las combinaciones utilizan únicamente niveles ya

contemplados en el análisis de sensibilidad. A diferencia del análisis individual, en la validación los parámetros se modifican simultáneamente, con el propósito de comprobar la capacidad de la función aproximada para representar la respuesta conjunta del modelo.

Tabla A15.2.

Casos de validación en condición estática

Zona	Caso	c (kPa)	φ (°)	γ (kN/m³)
Cresta	A desfavorable	11.71	22.40	15.34
Cresta	B favorable	17.57	33.60	10.22
Cresta	C mixto	16.10	25.20	14.06
Zona media	A desfavorable	0.68	26.40	18.68
Zona media	B favorable	1.02	39.60	12.46
Zona media	C mixto	0.94	29.70	17.13
Pie del talud	A desfavorable	11.10	24.80	24.07
Pie del talud	B favorable	16.64	37.20	16.05
Pie del talud	C mixto	15.26	27.90	22.07

Nota. En condición estática se mantuvieron sin modificación la geometría, el método de Spencer, el criterio Mohr-Coulomb y las demás condiciones del modelo. Únicamente se modificaron c, φ y γ conforme a cada combinación.

Tabla A15.3.

Casos de validación en condición pseudoestática

Zona	Caso	c (kPa)	φ (°)	γ (kN/m³)	kh
Cresta	A desfavorable	11.71	22.40	15.34	0.3500
Cresta	B favorable	17.57	33.60	10.22	0.0875
Cresta	C mixto	16.10	25.20	14.06	0.2625
Zona media	A desfavorable	0.68	26.40	18.68	0.3500
Zona media	B favorable	1.02	39.60	12.46	0.0875
Zona media	C mixto	0.94	29.70	17.13	0.2625
Pie del talud	A desfavorable	11.10	24.80	24.07	0.3500
Pie del talud	B favorable	16.64	37.20	16.05	0.0875
Pie del talud	C mixto	15.26	27.90	22.07	0.2625

Nota. Los niveles de kh corresponden a valores previamente evaluados en el análisis pseudoestático. El coeficiente vertical kv permaneció fijo en 0.00.

A15.4. Ejemplo desarrollado: cresta estática - Caso A desfavorable

Para la cresta en condición estática, el Caso A emplea c = 11.71 kPa, φ = 22.40° y γ = 15.34 kN/m³. Los valores base de la función aproximada son c0 = 14.64 kPa, φ0 = 28.00° y γ0 = 12.78 kN/m³. Las variaciones relativas son:

$$\delta c = (11.71 - 14.64) / 14.64 = -0.20014$$

$$\delta \varphi = (22.40 - 28.00) / 28.00 = -0.20000$$

$$\delta \gamma = (15.34 - 12.78) / 12.78 = +0.20031$$

Con FSbase = 1.393, Sc = 0.8125, Sφ = 0.6700 y Sγ = -0.8475, el factor de seguridad aproximado se obtiene mediante:

$$FS_{aprox} = 1.393 + 0.8125(-0.20014) + 0.6700(-0.20000) - 0.8475(+0.20031)$$

$$FS_{aprox} = 0.9266 \approx 0.927$$

La corrida directa en Slide V6.004 mediante Spencer para esta misma combinación produjo FS = 0.987. A partir de ambos valores se determinaron el error absoluto y el error relativo:

$$Error\ absoluto = |0.987 - 0.927| = 0.060$$

$$Error\ relativo = \frac{0.060}{0.987} \times 100 = 6.08\,\%$$

El mismo procedimiento se aplicó a los 18 casos de validación. Los resultados completos se presentan en las Tablas A15.4 y A15.5.

A15.5. Resultados completos de la validación

Tabla A15.4.

Resultados de validación del modelo aproximado en condición estática

Zona	Caso	FS aprox.	FS Slide	Error abs.	Error rel. (%)
Cresta	A desfavorable	0.927	0.987	0.060	6.08
Cresta	B favorable	1.859	1.943	0.084	4.32
Cresta	C mixto	1.322	1.320	0.002	0.15
Zona media	A desfavorable	0.398	0.416	0.018	4.33
Zona media	B favorable	0.722	0.745	0.023	3.09
Zona media	C mixto	0.501	0.506	0.005	0.99
Pie del talud	A desfavorable	0.763	0.816	0.053	6.50
Pie del talud	B favorable	1.495	1.555	0.060	3.86
Pie del talud	C mixto	1.051	1.059	0.008	0.76

Nota. El error relativo se calculó respecto del factor de seguridad obtenido directamente en Slide V6.004. En los nueve casos estáticos, el error relativo medio fue aproximadamente 3.34 % y el máximo fue 6.50 %.

Tabla A15.5.

Resultados de validación del modelo aproximado en condición pseudoestática

Zona	Caso	FS aprox.	FS Slide	Error abs.	Error rel. (%)
Cresta	A desfavorable	0.637	0.807	0.170	21.07
Cresta	B favorable	1.588	1.577	0.011	0.70
Cresta	C mixto	1.017	1.074	0.057	5.31
Zona media	A desfavorable	0.202	0.317	0.115	36.28
Zona media	B favorable	0.595	0.560	0.035	6.25
Zona media	C mixto	0.333	0.384	0.051	13.28
Pie del talud	A desfavorable	0.516	0.731	0.215	29.41
Pie del talud	B favorable	1.388	1.329	0.059	4.44
Pie del talud	C mixto	0.828	0.903	0.075	8.31

Nota. En los nueve casos pseudoestáticos, el error relativo medio fue aproximadamente 13.89 % y el máximo fue 36.28 %. Las mayores diferencias se concentraron en los casos desfavorables extremos.

A15.6. Síntesis del desempeño del modelo aproximado

Tabla A15.6.

Síntesis de los errores obtenidos en la validación

Condición	Casos	Error medio (%)	Error máx. (%)	Rango (%)	Interpretación
Estática	9	3.34	6.50	0.15 - 6.50	Mayor proximidad con Slide
Pseudoestática	9	13.89	36.28	0.70 - 36.28	Mayor desviación en casos desfavorables extremos
Total	18	8.62	36.28	0.15 - 36.28	Desempeño dependiente de la condición

Nota. Los valores corresponden a los 18 casos de validación desarrollados. El error promedio total se presenta únicamente como síntesis global y no sustituye la interpretación diferenciada de las condiciones estática y pseudoestática.

En condición estática, la función aproximada mostró errores relativos comprendidos entre 0.15 % y 6.50 %, con un promedio de 3.34 %. En condición pseudoestática, los errores variaron entre 0.70 % y 36.28 %, con un promedio de 13.89 %, evidenciando una menor precisión de la aproximación lineal cuando se combinan simultáneamente condiciones desfavorables y la acción sísmica horizontal.

En los 18 casos evaluados, la función aproximada y las corridas directas en Slide coincidieron en la clasificación respecto del umbral mecánico FS = 1.00. Esta

coincidencia no elimina las diferencias cuantitativas observadas, especialmente en los escenarios pseudoestáticos desfavorables, pero permite comprobar que la aproximación mantuvo la misma clasificación mecánica en los casos de validación considerados.

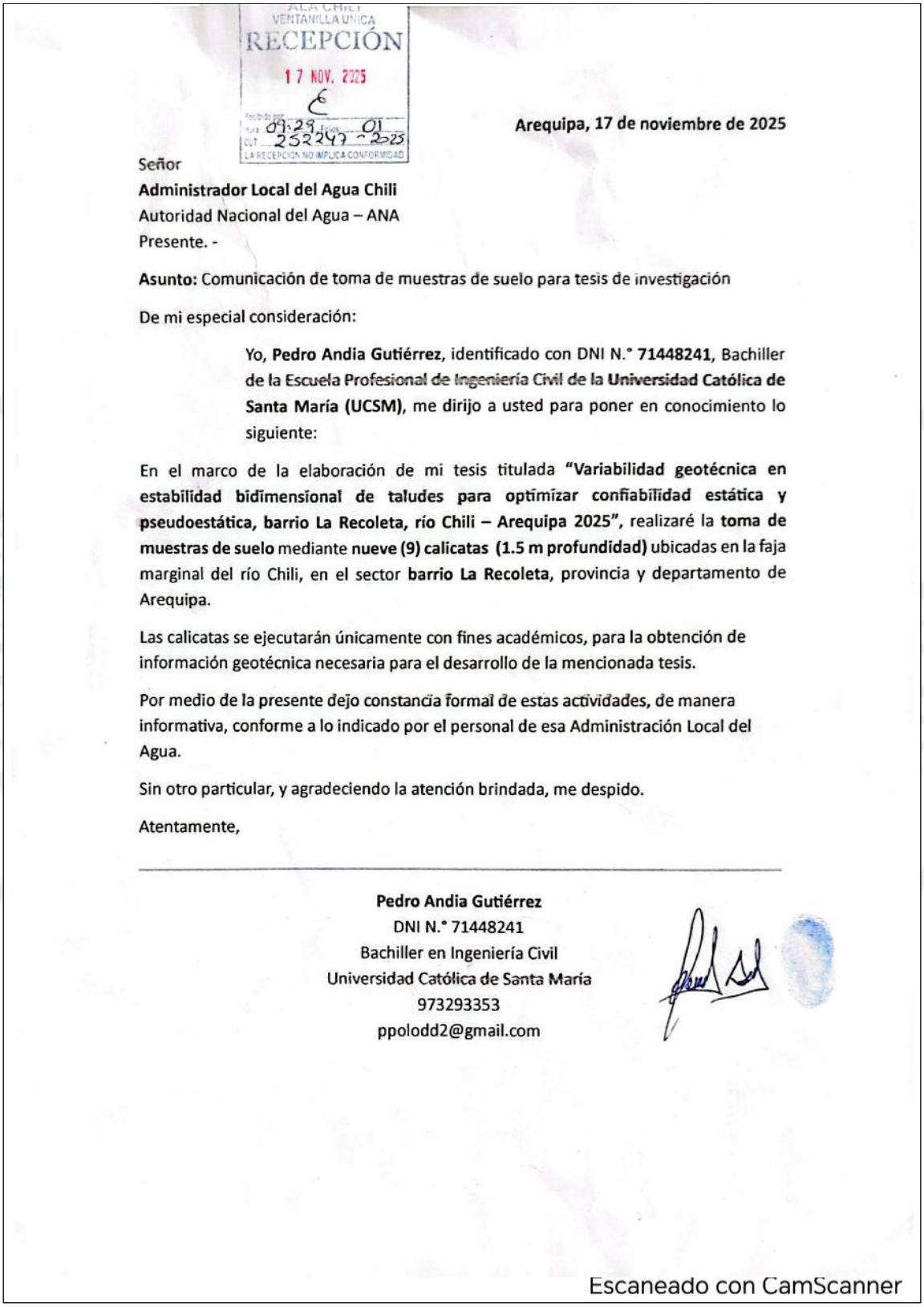
A15.7. Alcance de la validación

La validación muestra una mayor proximidad con Slide en condición estática y mayores desviaciones en condición pseudoestática, especialmente bajo combinaciones extremas. En consecuencia, la simulación Monte Carlo conserva un alcance complementario y exploratorio: las 10 000 iteraciones mejoran la estabilidad numérica dentro de la función de respuesta asumida, pero no eliminan la incertidumbre de la aproximación ni constituyen probabilidades absolutas de falla. Los resultados determinísticos obtenidos directamente mediante Slide V6.004 mantienen el carácter principal para la evaluación de estabilidad.

ANEXO 16. Documentación complementaria

El presente anexo contiene documentación complementaria relacionada con el desarrollo de la investigación. Se incluyen documentos de respaldo vinculados a la comunicación institucional realizada para las actividades de campo y la constancia o certificado correspondiente a los ensayos de laboratorio empleados en la caracterización geotécnica del suelo.

A16.1. Comunicación presentada ante la Autoridad Nacional del Agua – Administración Local del Agua Chili



ALA CHILI
VENTANILLA UNICA
RECEPCIÓN
17 NOV. 2025
Recibido por: 09:29 Folios: 01
CUT 252247 - 2025
LA RECEPCIÓN NO IMPLICA CONFORMIDAD

Arequipa, 17 de noviembre de 2025

Señor
Administrador Local del Agua Chili
Autoridad Nacional del Agua – ANA
Presente. -

Asunto: Comunicación de toma de muestras de suelo para tesis de investigación

De mi especial consideración:

Yo, **Pedro Andia Gutiérrez**, identificado con DNI N.° **71448241**, Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la **Universidad Católica de Santa María (UCSM)**, me dirijo a usted para poner en conocimiento lo siguiente:

En el marco de la elaboración de mi tesis titulada **"Variabilidad geotécnica en estabilidad bidimensional de taludes para optimizar confiabilidad estática y pseudoestática, barrio La Recoleta, río Chili – Arequipa 2025"**, realizaré la **toma de muestras de suelo** mediante **nueve (9) calicatas (1.5 m profundidad)** ubicadas en la faja marginal del río Chili, en el sector **barrio La Recoleta**, provincia y departamento de Arequipa.

Las calicatas se ejecutarán únicamente con fines académicos, para la obtención de información geotécnica necesaria para el desarrollo de la mencionada tesis.

Por medio de la presente dejo constancia formal de estas actividades, de manera informativa, conforme a lo indicado por el personal de esa Administración Local del Agua.

Sin otro particular, y agradeciendo la atención brindada, me despido.

Atentamente,

Pedro Andia Gutiérrez
DNI N.° 71448241
Bachiller en Ingeniería Civil
Universidad Católica de Santa María
973293353
ppolodd2@gmail.com

Escaneado con CamScanner

Nota. Documento presentado como comunicación formal relacionada con las actividades de exploración geotécnica desarrolladas en el área de estudio. Elaboración propia.

A16.2. Certificado o constancia de laboratorio

Universidad Católica de Santa María

Sentimiento Santamariano

/E.P. Ingeniería Civil

Campus Central
Urb. San José s/n Umacollo
Arequipa - Perú
(+54) – 382038

UCSM.EDU.PE

CONSTANCIA ID-014268
Laboratorio de Ensayo de Ingeniería Civil

Quien suscribe, Mgter. Ing. Ing. MILAGROS SOCORRO GUILLEN MALAGA, Directora de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil - FAICA - UCSM.

HACE CONSTAR
Que el (los) Señor(es) Bachiller(es) en Ingeniería Civil:

PEDRO PAUL ANDIA GUTIERREZ (DNI - 71448241)

Ha realizado los ensayos en los Laboratorios de Ingeniería Civil, correspondientes a su trabajo de tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil, con la tesis denominada:

"INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD DE LOS PARáMETROS GEOTéCNICOS EN LA ESTABILIDAD BIDIMENSIONAL DEL TALUD EN EL SECTOR DEL BARRIO LA RECOLECTA, RíO CHILI, 2024"
Asesor de Tesis: Mgter. Luz Matilde García Godos Peñaloza.

Detallado de los ensayos efectuados en el laboratorio:

PERIODO:	17/11/2025 al 12/12/2025.
PRESUPUESTO:	Ver anexo 01
DERECHO USO LABORATORIO POR TESIS:	Opción " 3 "
TOTAL A PAGAR POR TESIS:	S/ 719.25
COMPROBANTE:	B017-00003499

Se expide la presente constancia para los fines convenientes.

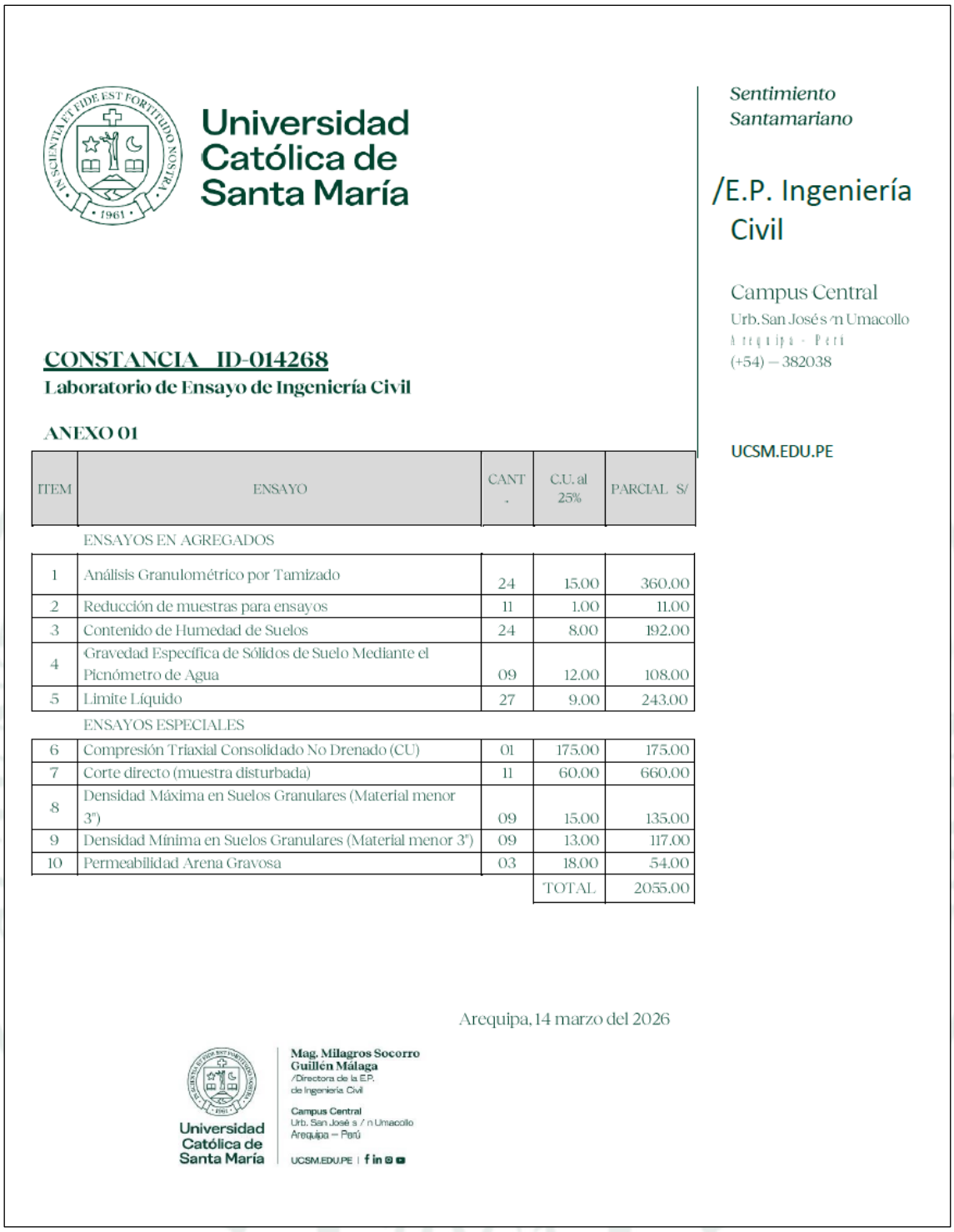
Arequipa, 14 marzo del 2026

Universidad Católica de Santa María

Mag. Milagros Socorro Guillén Málaga
/Directora de la E.P. de Ingeniería Civil

Campus Central
Urb. San José s / n Umacollo
Arequipa – Perú

UCSM.EDU.PE



Universidad Católica de Santa María

Sentimiento Santamariano

/E.P. Ingeniería Civil

Campus Central
Urb. San José s/n Umacollo
Arequipa - Perú
(+54) – 382038

UCSM.EDU.PE

CONSTANCIA ID-014268

Laboratorio de Ensayo de Ingeniería Civil

ANEXO 01

ITEM	ENSAYO	CANT.	C.U. al 25%	PARCIAL S/
	ENSAYOS EN AGREGADOS			
1	Análisis Granulométrico por Tamizado	24	15.00	360.00
2	Reducción de muestras para ensayos	11	1.00	11.00
3	Contenido de Humedad de Suelos	24	8.00	192.00
4	Gravedad Específica de Sólidos de Suelo Mediante el Picnómetro de Agua	09	12.00	108.00
5	Límite Líquido	27	9.00	243.00
	ENSAYOS ESPECIALES			
6	Compresión Triaxial Consolidado No Drenado (CU)	01	175.00	175.00
7	Corte directo (muestra disturbada)	11	60.00	660.00
8	Densidad Máxima en Suelos Granulares (Material menor 3")	09	15.00	135.00
9	Densidad Mínima en Suelos Granulares (Material menor 3")	09	13.00	117.00
10	Permeabilidad Arena Gravosa	03	18.00	54.00
			TOTAL	2055.00

Arequipa, 14 marzo del 2026

Universidad Católica de Santa María

Mag. Milagros Socorro Guillén Málaga
/Directora de la E.P. de Ingeniería Civil
Campus Central
Urb. San José s / n Umacollo
Arequipa – Perú
UCSM.EDU.PE

Nota. Constancia emitida por el Laboratorio de Ensayo de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Santa María, en la cual se consigna como periodo de realización de los ensayos del 17 de noviembre al 12 de diciembre de 2025. El documento se presenta íntegramente conforme fue emitido por la institución y conserva la denominación de la tesis vigente al momento de su emisión, la cual fue posteriormente reformulada durante el proceso de revisión académica. Asimismo, en el Anexo 01 de la constancia se consigna un ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado (CU); sin embargo, no se obtuvo un resultado válido de dicho ensayo debido a que el espécimen no logró mantener la integridad necesaria

durante su preparación y ejecución, produciéndose su desmoronamiento. Por esta razón, los parámetros de resistencia al corte empleados en la presente investigación corresponden a los resultados del ensayo de corte directo desarrollado sobre las muestras representativas seleccionadas.

ANEXO 17. Respaldo del análisis estadístico de sensibilidad de la simulación Monte Carlo

El presente anexo reúne las salidas obtenidas mediante ModelRisk utilizadas para respaldar el análisis estadístico de sensibilidad de la respuesta simulada desarrollado en las hipótesis específicas 4 y 5. Para cada sección representativa y condición de análisis se presentan los resultados correspondientes a 10 000 realizaciones Monte Carlo, incluyendo la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad, los coeficientes beta estandarizados y la contribución proporcional a la propagación de la respuesta.

Las realizaciones corresponden a combinaciones numéricas del modelo dentro de los rangos y distribuciones de escenario adoptados. Por ello, los indicadores presentados se utilizan para describir y jerarquizar la sensibilidad relativa de la respuesta simulada y no constituyen observaciones geotécnicas independientes, pruebas de significancia poblacional, caracterización probabilística espacial ni evidencia causal. El factor de seguridad empleado como salida proviene del modelo aproximado de respuesta validado en el Anexo 15, mientras que los resultados determinísticos obtenidos directamente mediante Slide V6.004 mantienen el carácter principal para la evaluación de estabilidad.

Para la trazabilidad de los resultados, en cada escenario se deja el espacio correspondiente para insertar las capturas originales del Results Viewer de ModelRisk. Deben colocarse las salidas de correlación de rango, coeficiente beta estandarizado y contribución proporcional que corresponden al mismo escenario y corrida utilizada para los valores consignados en las tablas de este anexo.

A17.1. Sensibilidad estadística Monte Carlo - cresta, condición estática

Para la cresta bajo condición estática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo considerando como variables de entrada c, φ y γ y como variable de salida el factor de seguridad. Las métricas se obtuvieron directamente del Results Viewer de ModelRisk.

Tabla A17.1.

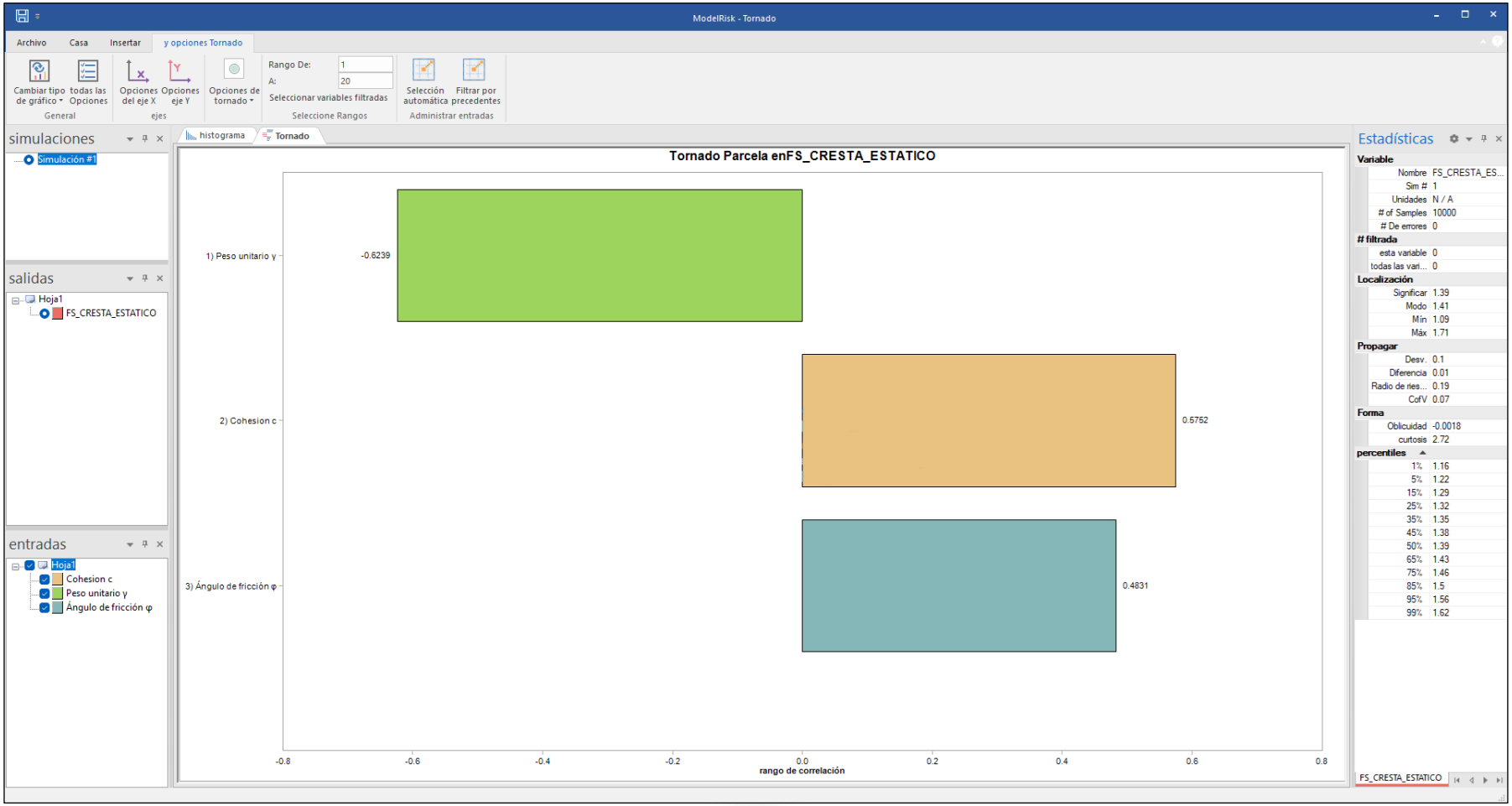
Resultados de sensibilidad estadística - cresta, condición estática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.5752	0.5888	34.70

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Ángulo de fricción interna, φ	0.4831	0.4968	24.47
Peso unitario, γ	-0.6239	-0.6411	40.83

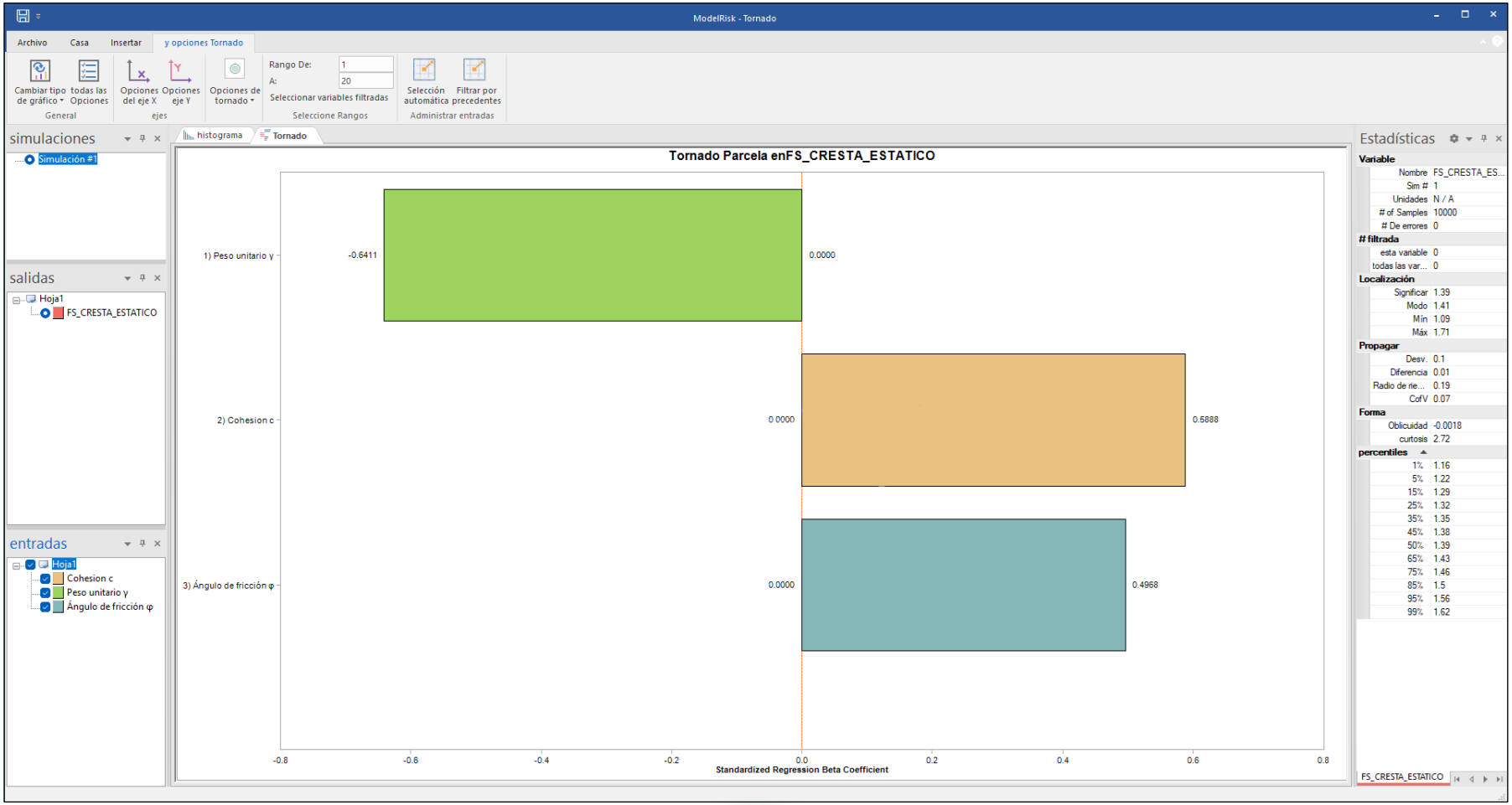
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-1. Correlación de rango - cresta - estática



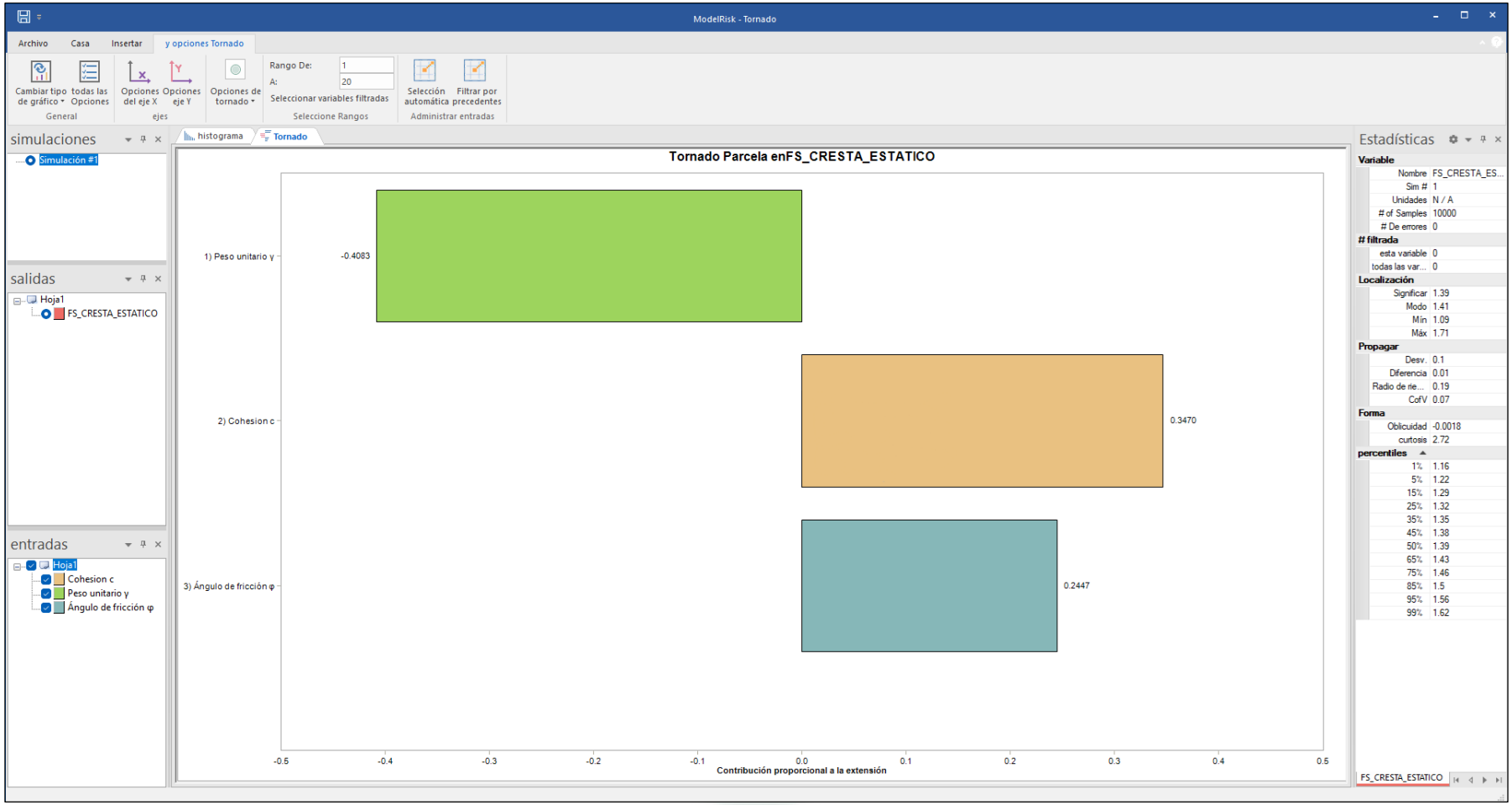
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para la cresta bajo condición estática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-2. Coeficientes beta estandarizados - cresta - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para la cresta bajo condición estática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-3. Contribución proporcional - cresta - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para la cresta bajo condición estática.

En este escenario, el peso unitario presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = -0.6411 y una contribución proporcional de 40.83 %, seguido de la cohesión con 34.70 % y del ángulo de fricción interna con 24.47 %. El signo negativo de γ indica una relación inversa con el FS, mientras que c y φ presentan relaciones directas.

A17.2. Sensibilidad estadística Monte Carlo - zona media, condición estática

Para la zona media bajo condición estática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo con c, φ y γ como entradas y el factor de seguridad como salida. Los indicadores estadísticos de sensibilidad fueron obtenidos directamente en ModelRisk.

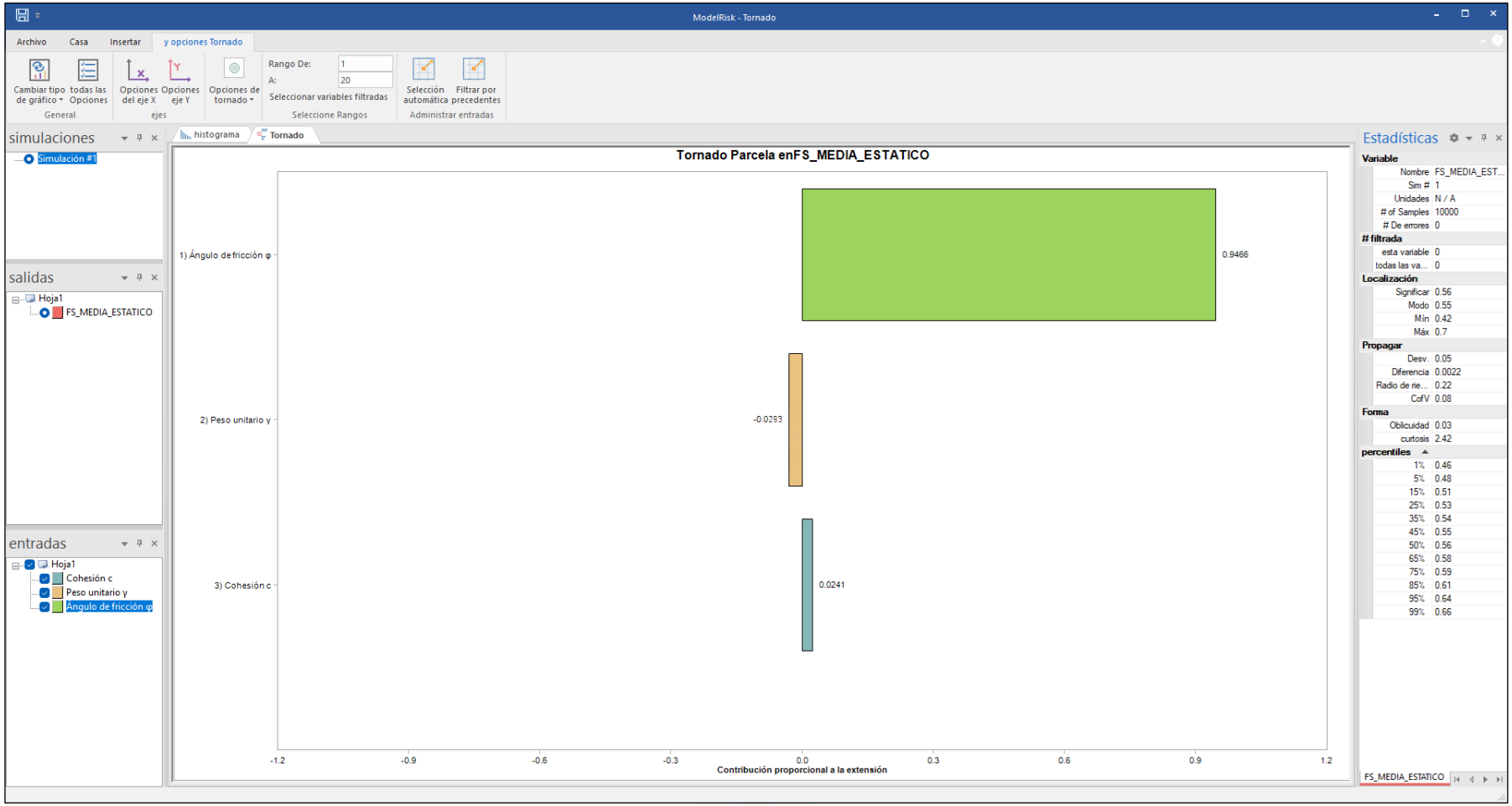
Tabla A17.2.

Resultados de sensibilidad estadística - zona media, condición estática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.1544	0.1802	2.41
Ángulo de fricción interna, φ	0.9682	0.9817	94.66
Peso unitario, γ	-0.1704	-0.1842	2.93

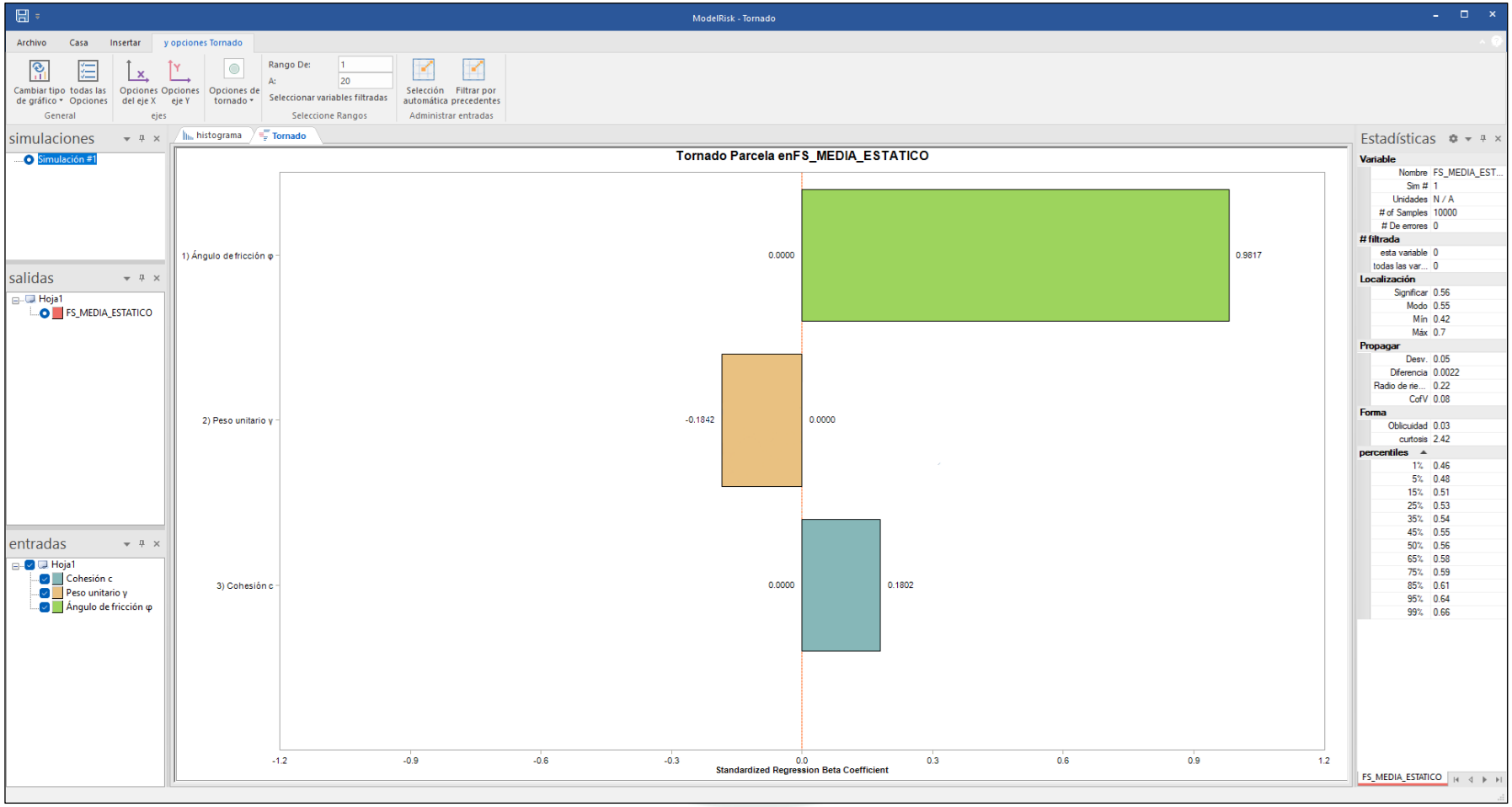
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-4. Correlación de rango - zona media - estática



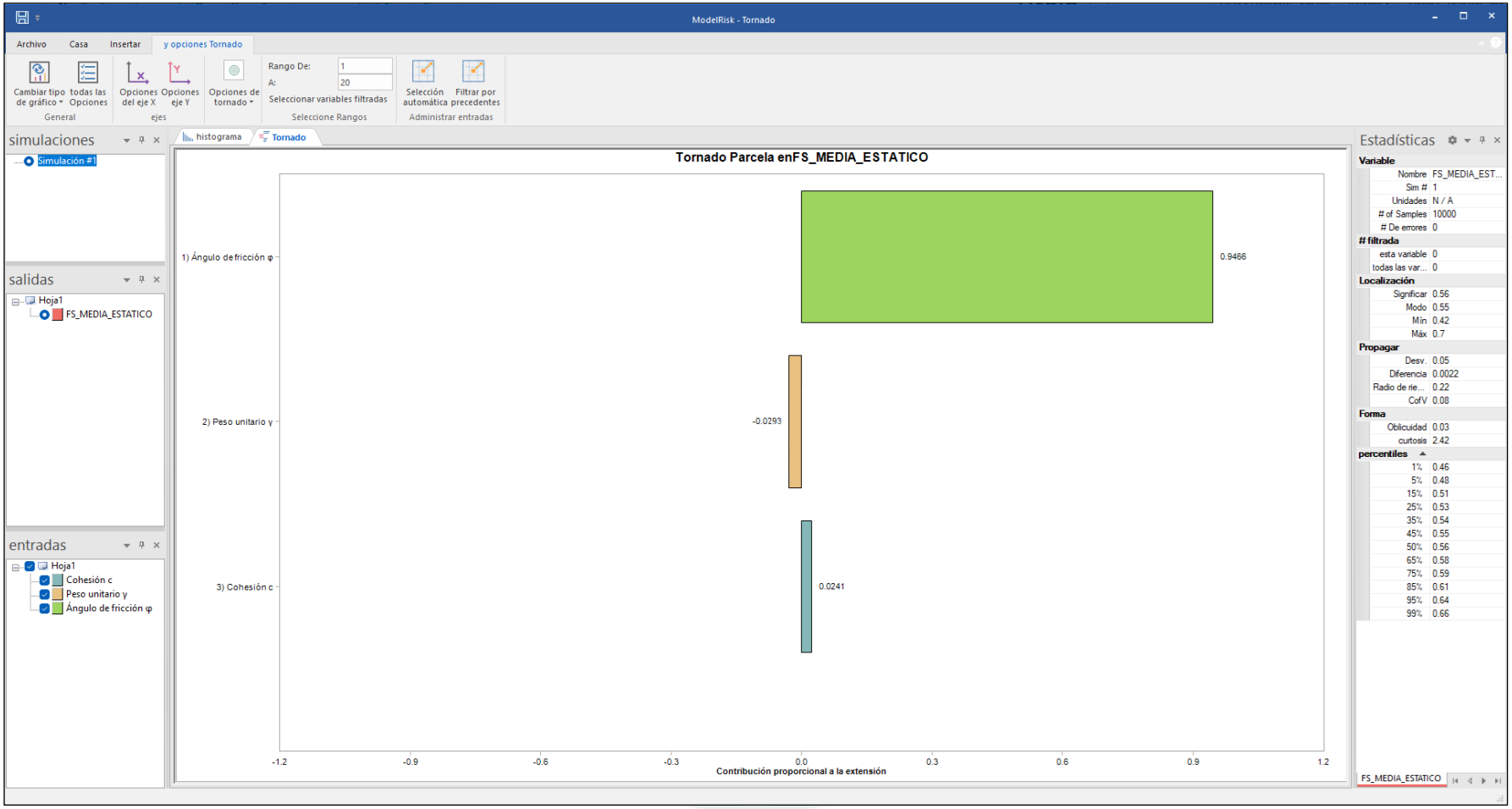
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para la zona media bajo condición estática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-5. Coeficientes beta estandarizados - zona media - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para la zona media bajo condición estática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-6. Contribución proporcional - zona media - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para la zona media bajo condición estática.

El ángulo de fricción interna mostró un predominio marcado, con β estandarizado = 0.9817 y una contribución proporcional de 94.66 %. La cohesión y el peso unitario presentaron contribuciones mucho menores, de 2.41 % y 2.93 %, respectivamente. Este resultado identifica a φ como la entrada de mayor sensibilidad relativa dentro de los rangos simulados para esta sección.

A17.3. Sensibilidad estadística Monte Carlo - pie del talud, condición estática

Para el pie del talud bajo condición estática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo considerando c, φ y γ como entradas y el factor de seguridad como salida. Las salidas se procesaron en el Results Viewer de ModelRisk.

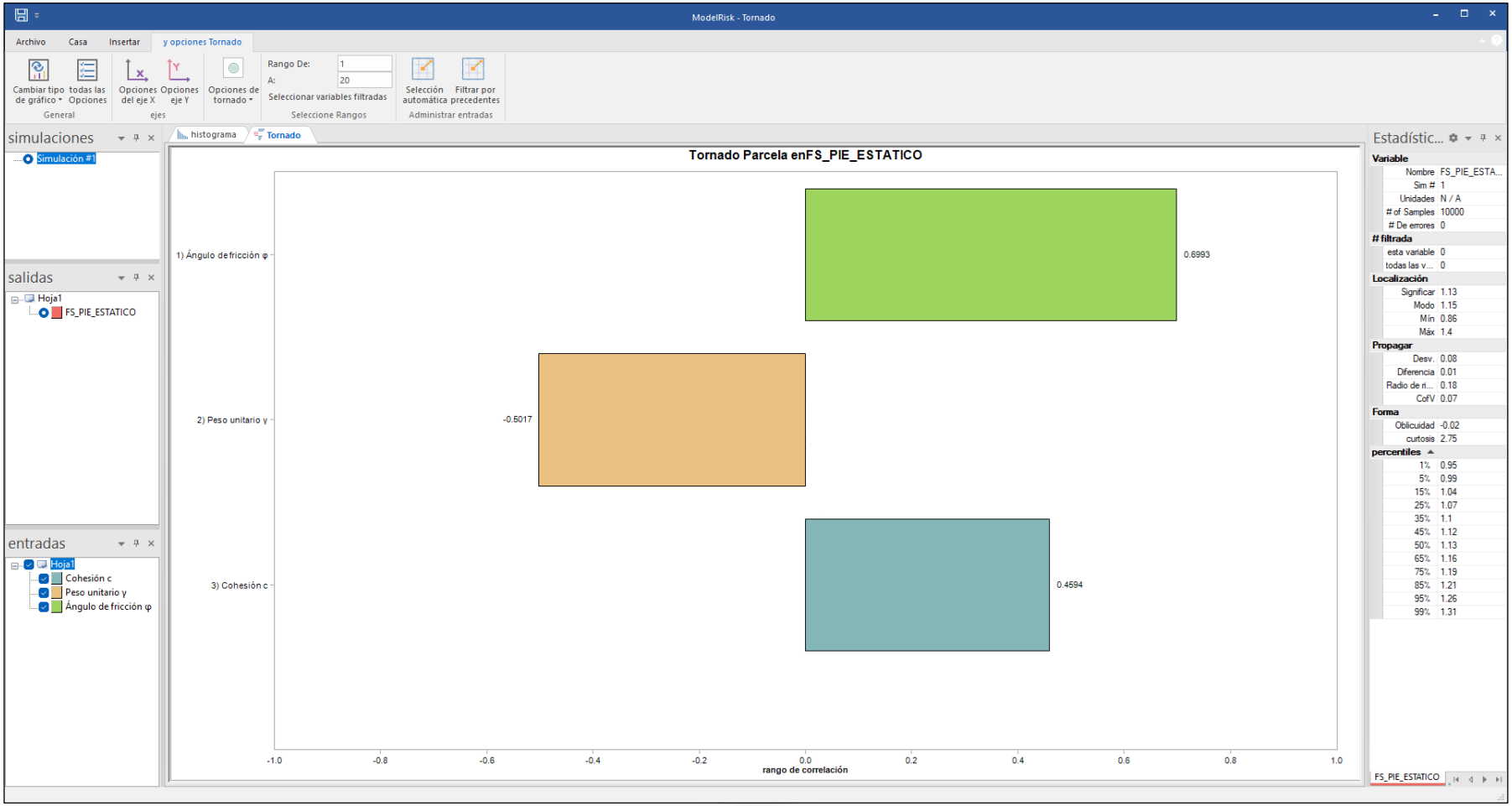
Tabla A17.3.

Resultados de sensibilidad estadística - pie del talud, condición estática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.4594	0.4836	22.18
Ángulo de fricción interna, φ	0.6993	0.7317	51.38
Peso unitario, γ	-0.5017	-0.5253	26.45

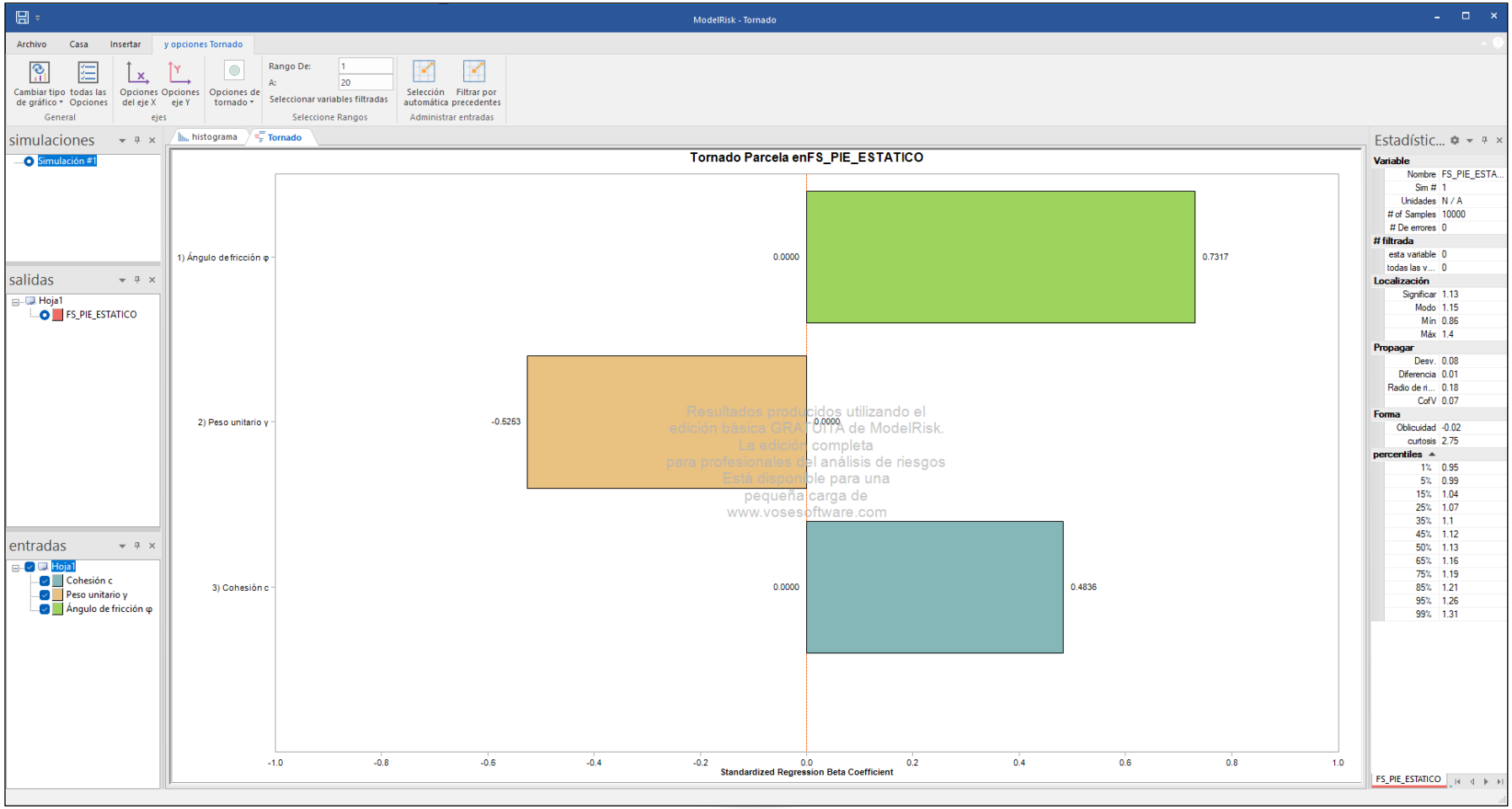
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-7. Correlación de rango - pie del talud - estática



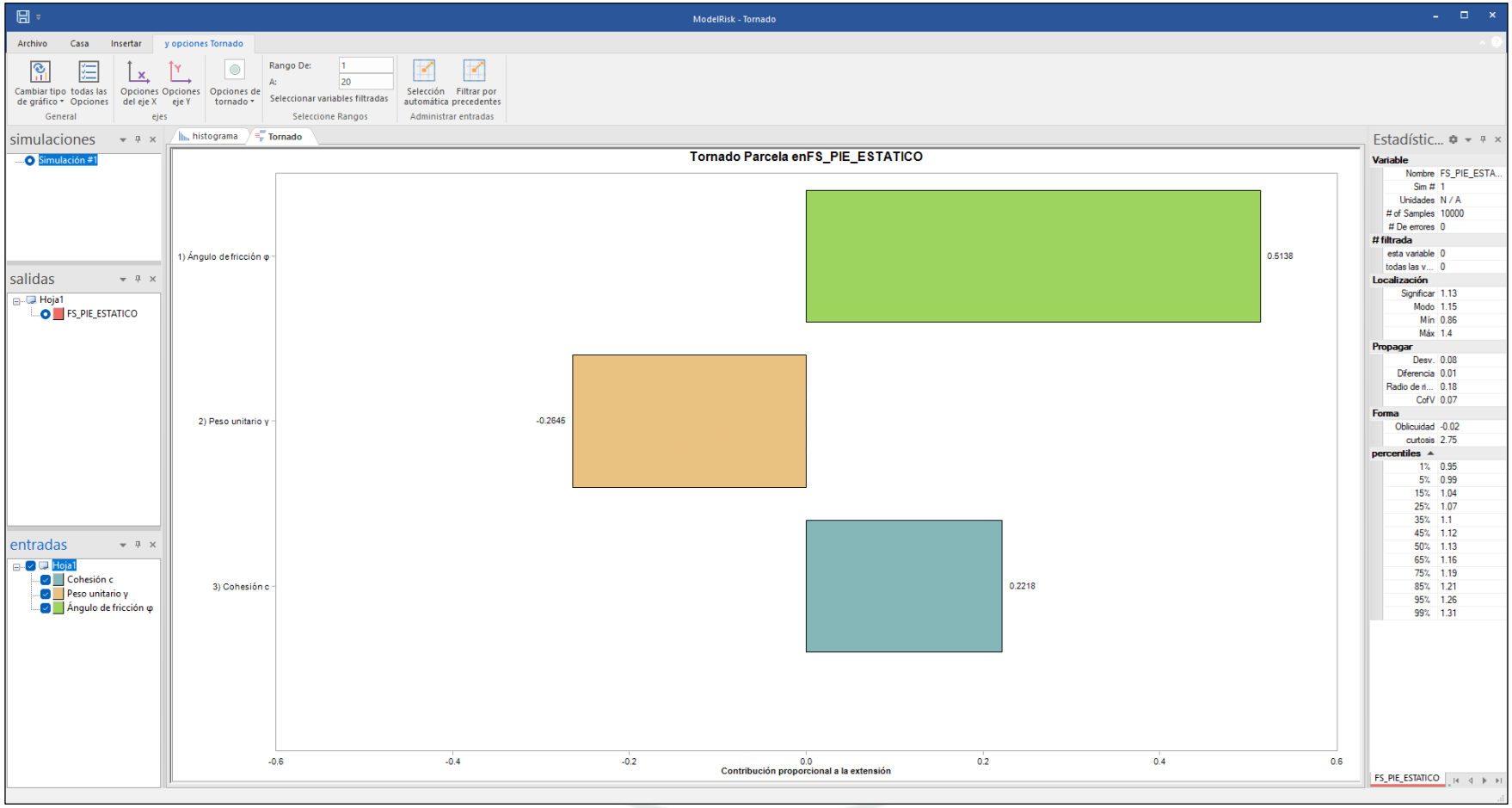
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para el pie del talud bajo condición estática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-8. Coeficientes beta estandarizados - pie del talud - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para el pie del talud bajo condición estática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-9. Contribución proporcional - pie del talud - estática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para el pie del talud bajo condición estática.

El ángulo de fricción interna presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = 0.7317 y una contribución proporcional de 51.38 %. Le siguieron el peso unitario con 26.45 % y la cohesión con 22.18 %. Los signos de los indicadores mantienen la dirección física esperada: c y φ se relacionan directamente con el FS y γ de manera inversa.

A17.4. Sensibilidad estadística Monte Carlo - cresta, condición pseudoestática

Para la cresta bajo condición pseudoestática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo incorporando c, φ, γ y kh como variables de entrada y el factor de seguridad pseudoestático como salida. Se consignan los resultados originales utilizados en la investigación.

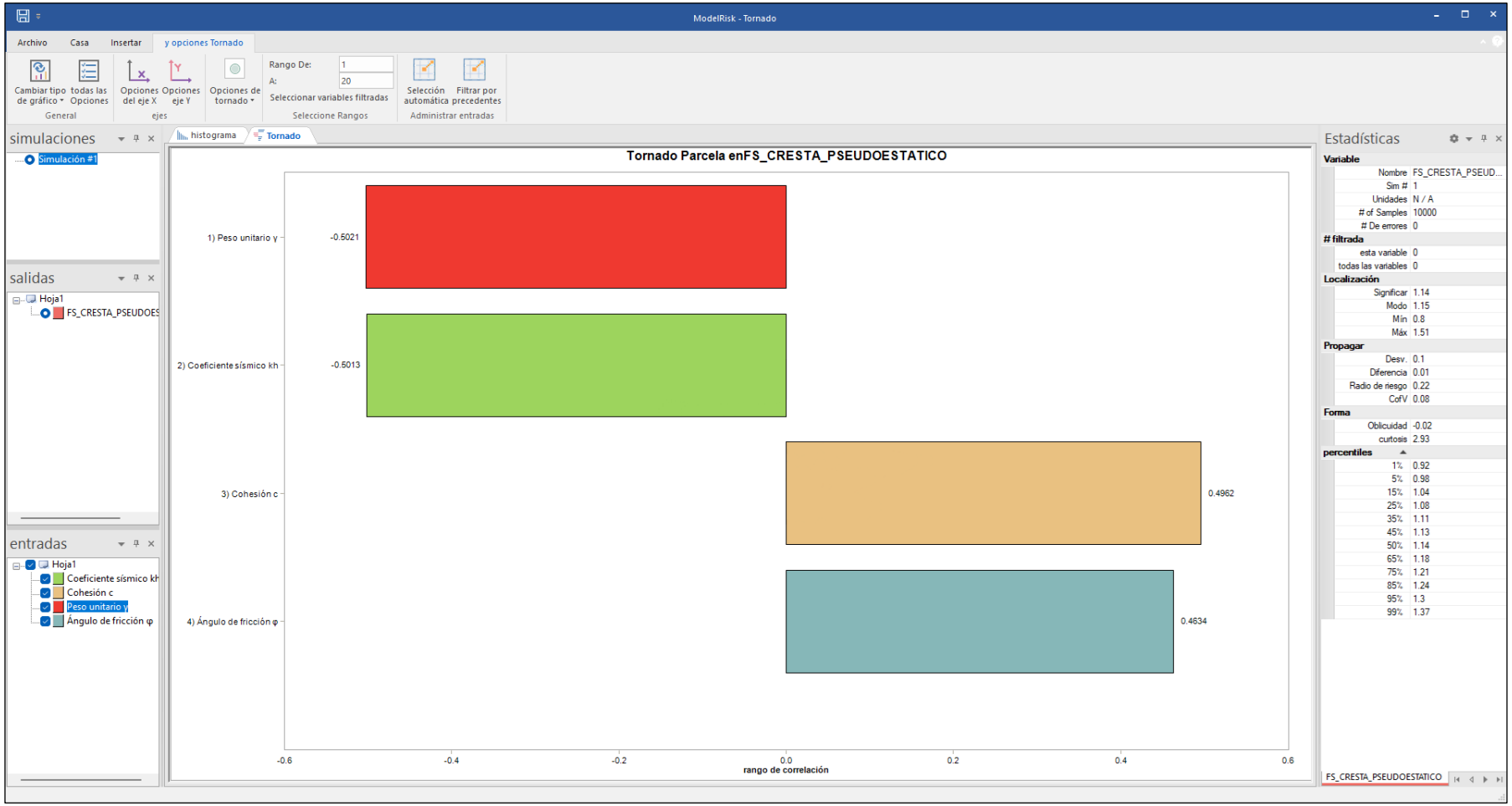
Tabla A17.4.

Resultados de sensibilidad estadística - cresta, condición pseudoestática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.4962	0.4807	25.53
Ángulo de fricción interna, φ	0.4634	0.4595	22.27
Peso unitario, γ	-0.5021	-0.4824	26.14
Coeficiente sísmico horizontal, kh	-0.5013	-0.4951	26.06

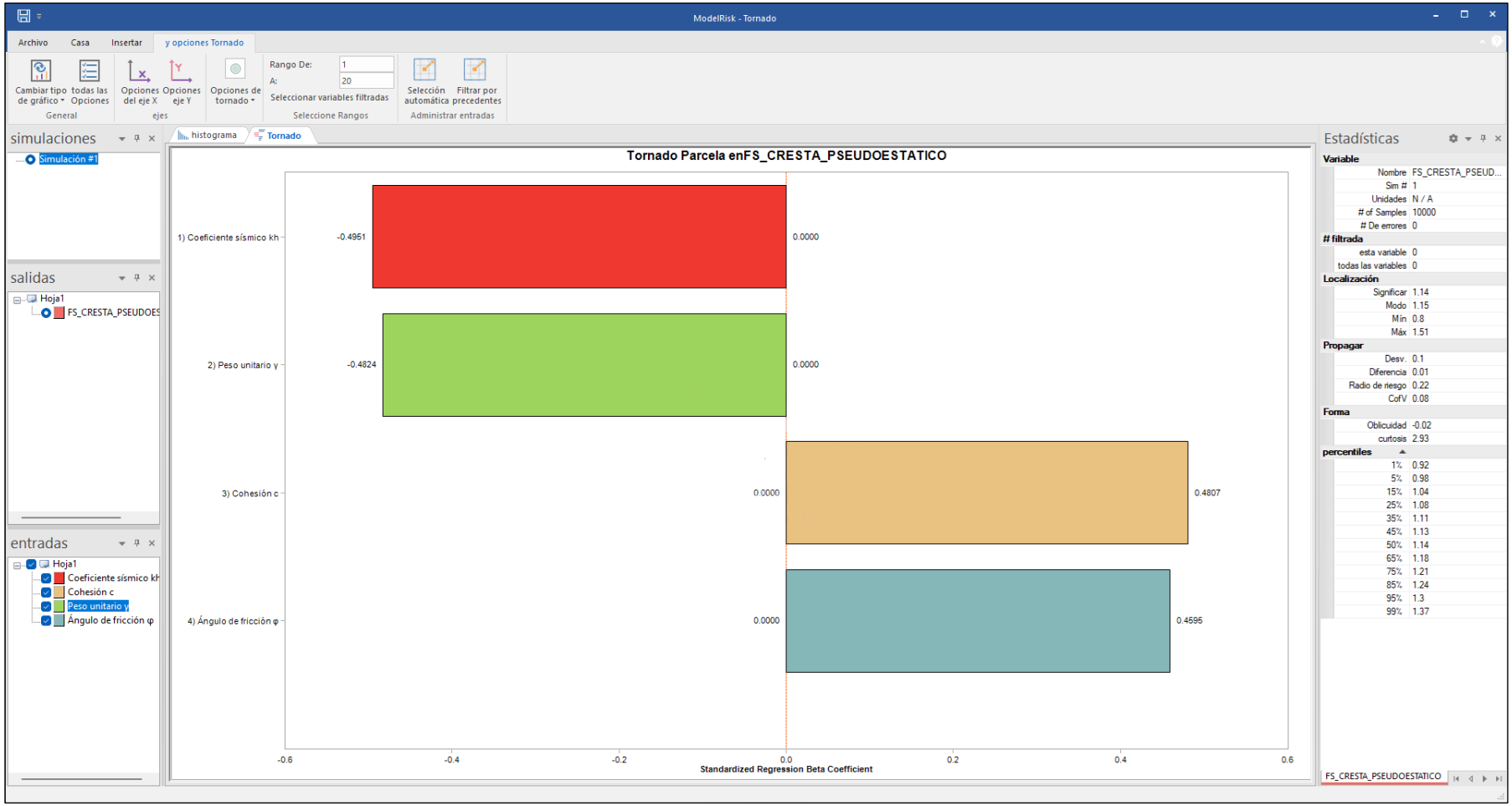
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-10. Correlación de rango - cresta - pseudoestática



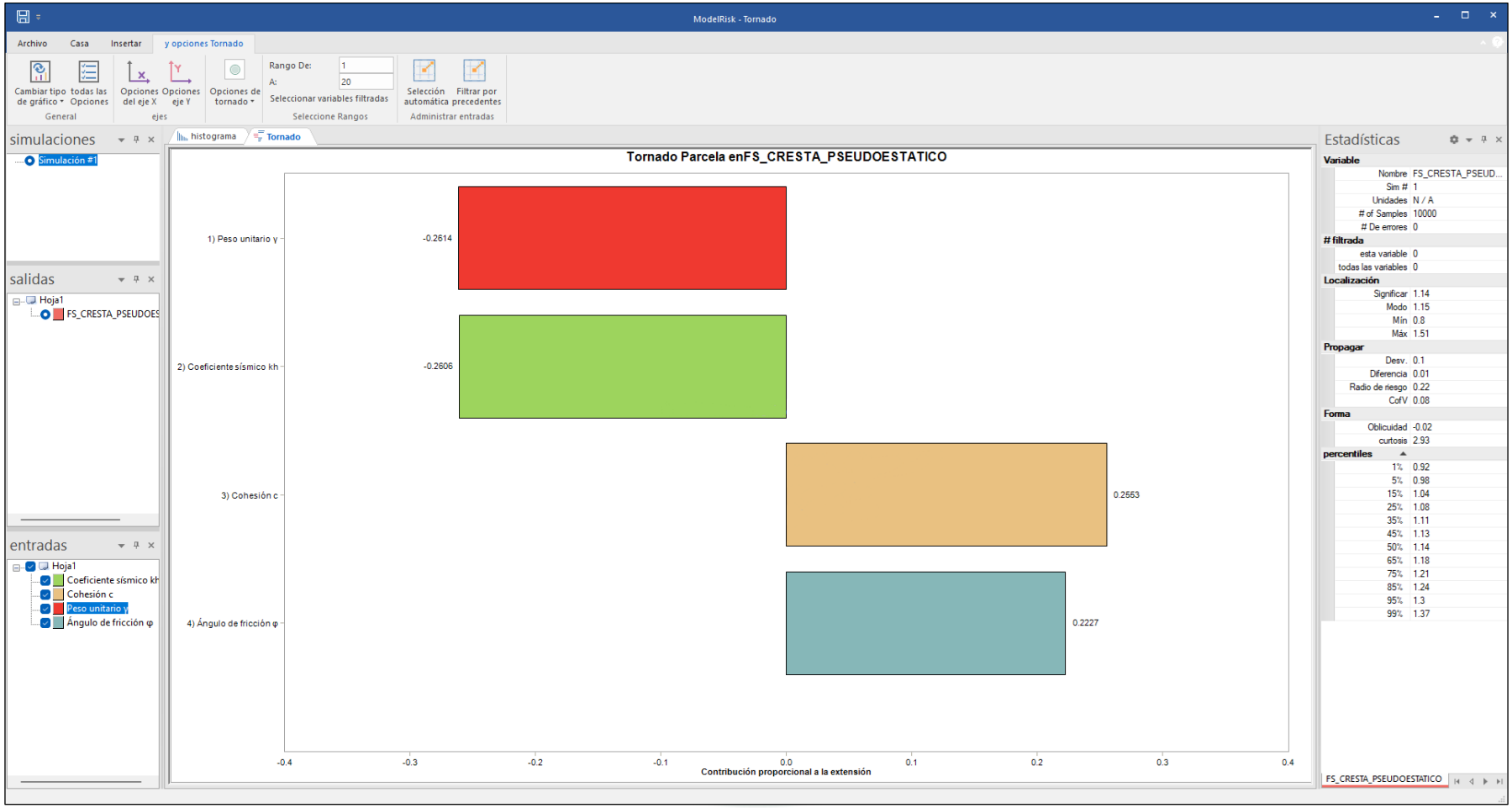
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para la cresta bajo condición pseudoestática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-11. Coeficientes beta estandarizados - cresta - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para la cresta bajo condición pseudoestática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-12. Contribución proporcional - cresta - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para la cresta bajo condición pseudoestática.

En la cresta pseudoestática no se identificó un predominio marcado de una única variable. Las contribuciones fueron próximas entre sí: 26.14 % para γ, 26.06 % para kh, 25.53 % para c y 22.27 % para φ. Del mismo modo, los valores absolutos de β estandarizado se situaron entre 0.4595 y 0.4951, evidenciando una sensibilidad distribuida dentro del escenario simulado.

A17.5. Sensibilidad estadística Monte Carlo - zona media, condición pseudoestática

Para la zona media bajo condición pseudoestática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo considerando c, φ, γ y kh como entradas y el factor de seguridad pseudoestático como salida. Los indicadores fueron extraídos directamente del análisis de sensibilidad de ModelRisk.

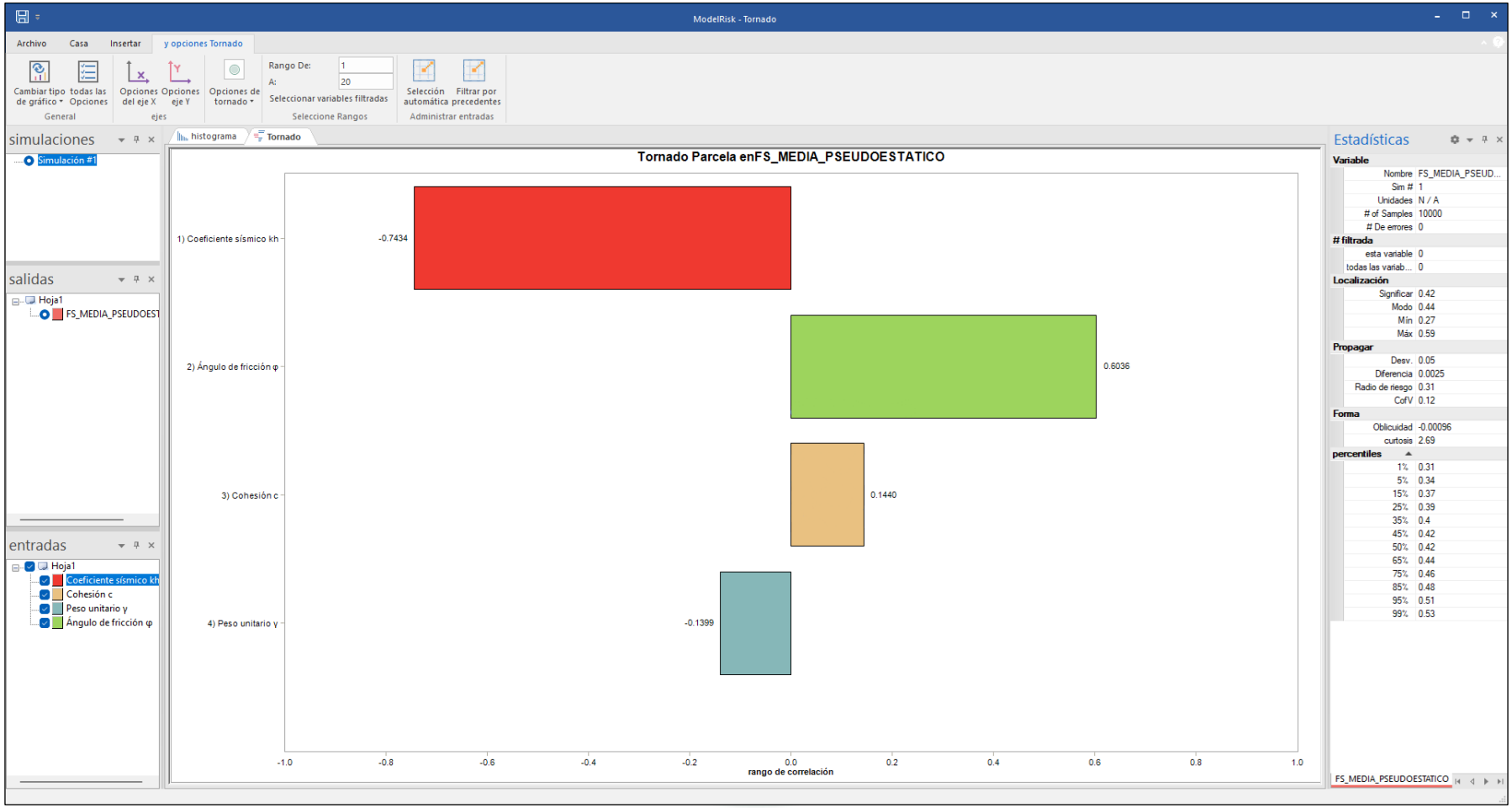
Tabla A17.5.

Resultados de sensibilidad estadística - zona media, condición pseudoestática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.1440	0.1516	2.46
Ángulo de fricción interna, φ	0.6036	0.6312	38.06
Peso unitario, γ	-0.1399	-0.1588	2.04
Coeficiente sísmico horizontal, kh	-0.7434	-0.7395	57.73

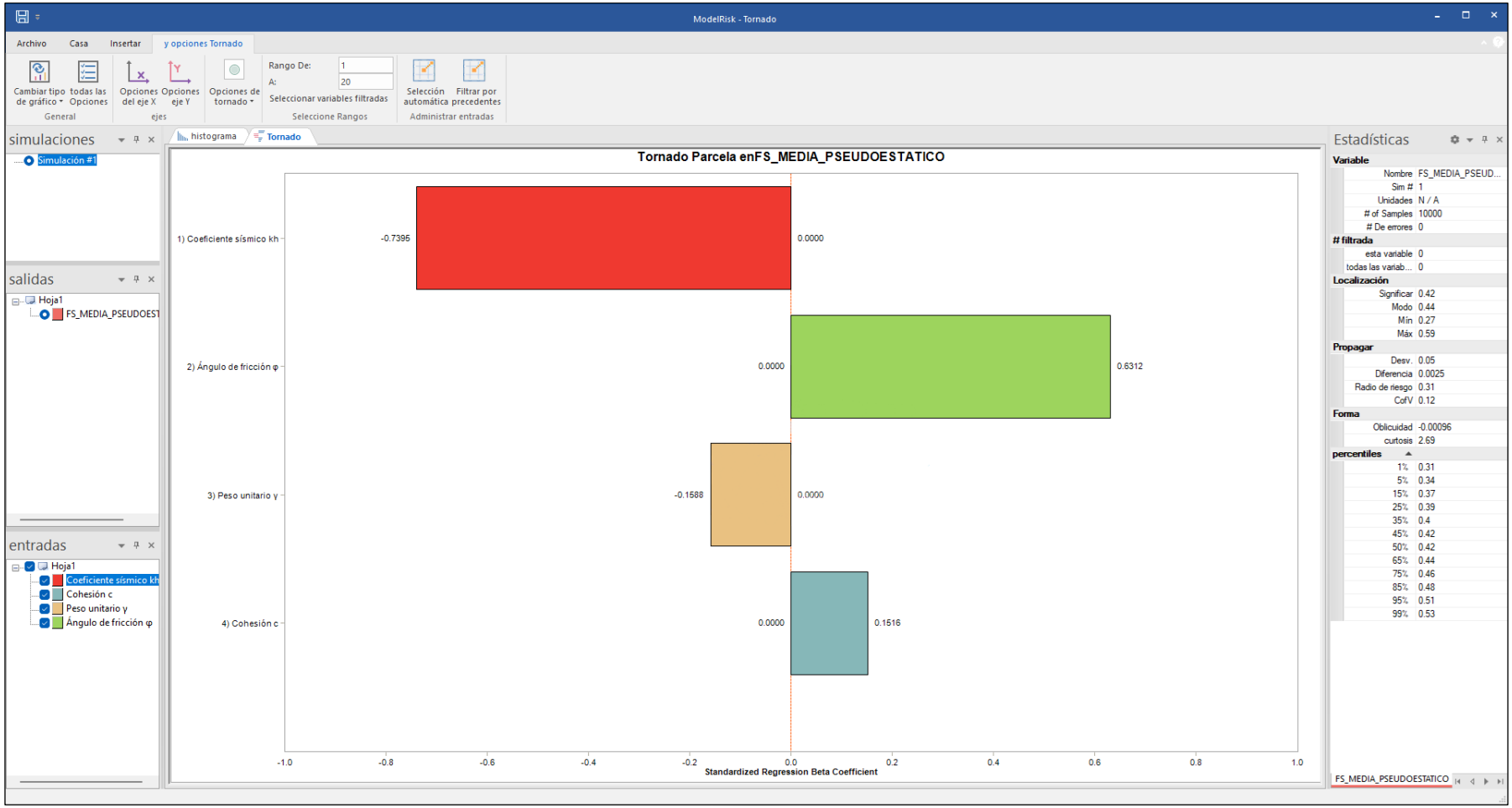
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-13. Correlación de rango - zona media - pseudoestática



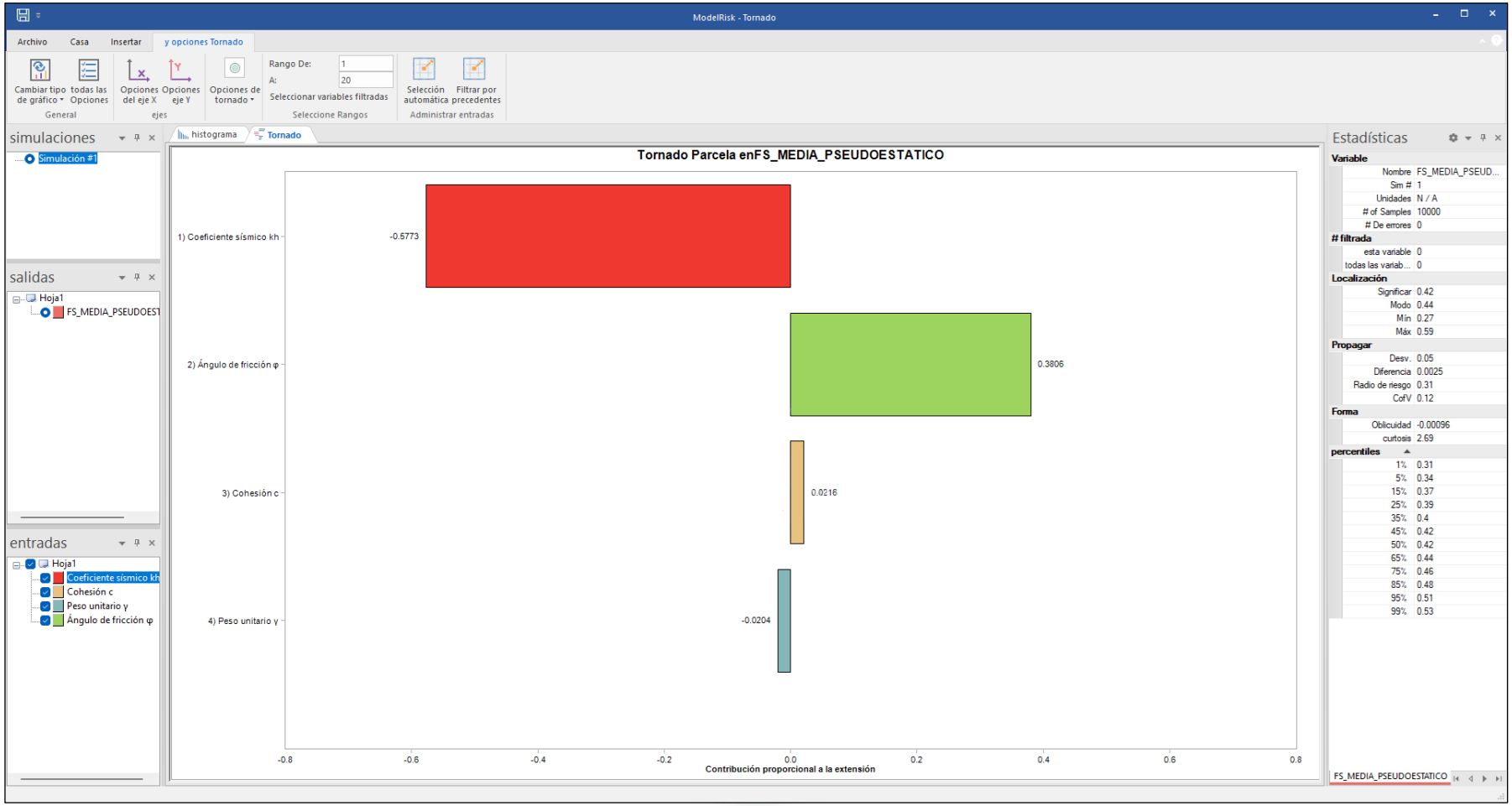
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para la zona media bajo condición pseudoestática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-14. Coeficientes beta estandarizados - zona media - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para la zona media bajo condición pseudoestática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-15. Contribución proporcional - zona media - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para la zona media bajo condición pseudoestática.

El coeficiente sísmico horizontal presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = -0.7395 y una contribución proporcional de 57.73 %, seguido por el ángulo de fricción interna con β = 0.6312 y 38.06 %. La cohesión y el peso unitario presentaron contribuciones reducidas. La suma de los porcentajes mostrados puede diferir ligeramente de 100 % debido al reporte y redondeo del software.

A17.6. Sensibilidad estadística Monte Carlo - pie del talud, condición pseudoestática

Para el pie del talud bajo condición pseudoestática se analizaron 10 000 realizaciones Monte Carlo incorporando c, φ, γ y kh como variables de entrada y el factor de seguridad pseudoestático como salida. Los resultados corresponden a las salidas del Results Viewer de ModelRisk.

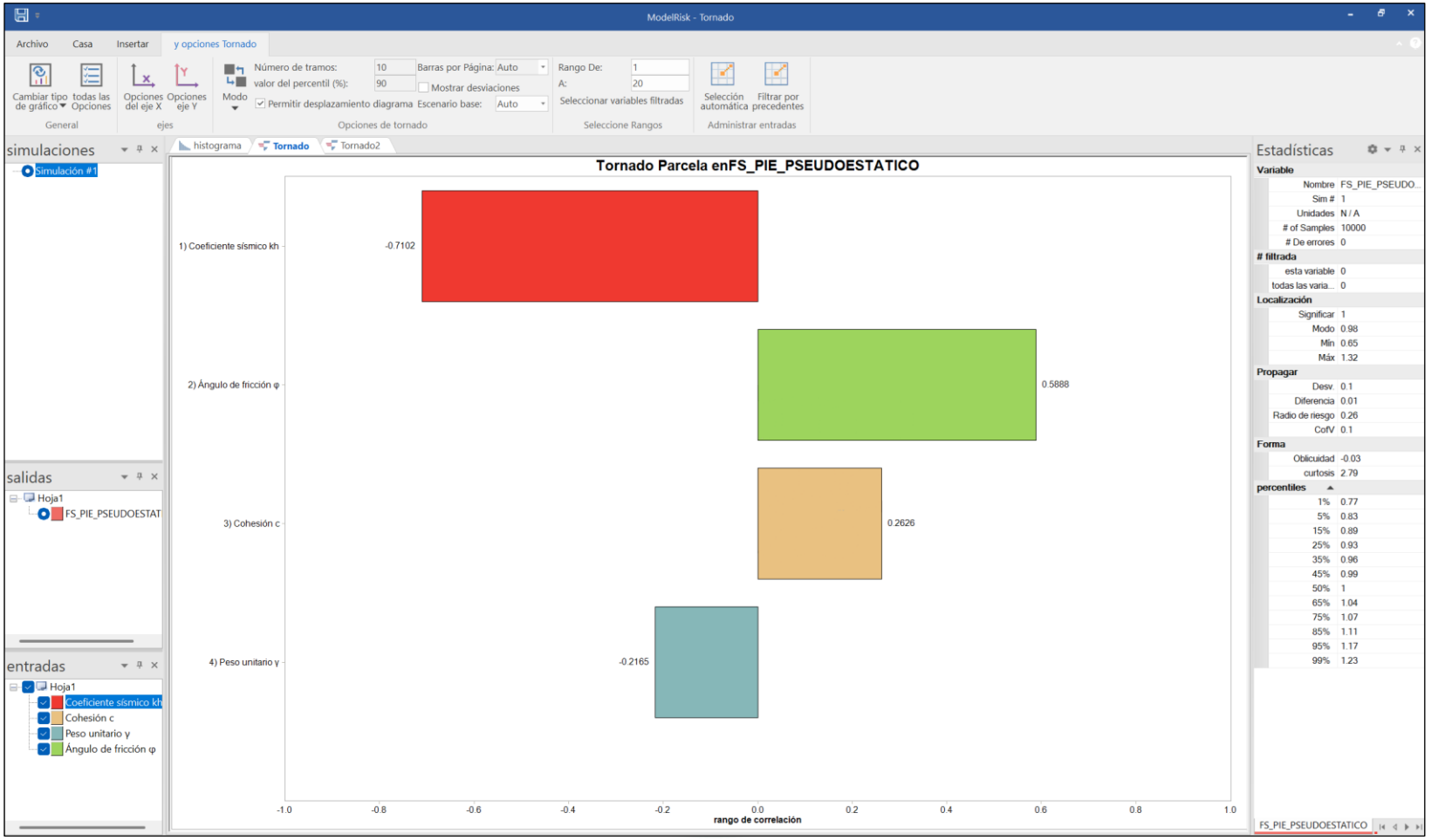
Tabla A17.6.

Resultados de sensibilidad estadística - pie del talud, condición pseudoestática

Parámetro	Correlación de rango	β estandarizado	Contribución proporcional (%)
Cohesión, c	0.2626	0.2653	7.13
Ángulo de fricción interna, φ	0.5888	0.6182	35.85
Peso unitario, γ	-0.2165	-0.2291	4.85
Coeficiente sísmico horizontal, kh	-0.7102	-0.7175	52.17

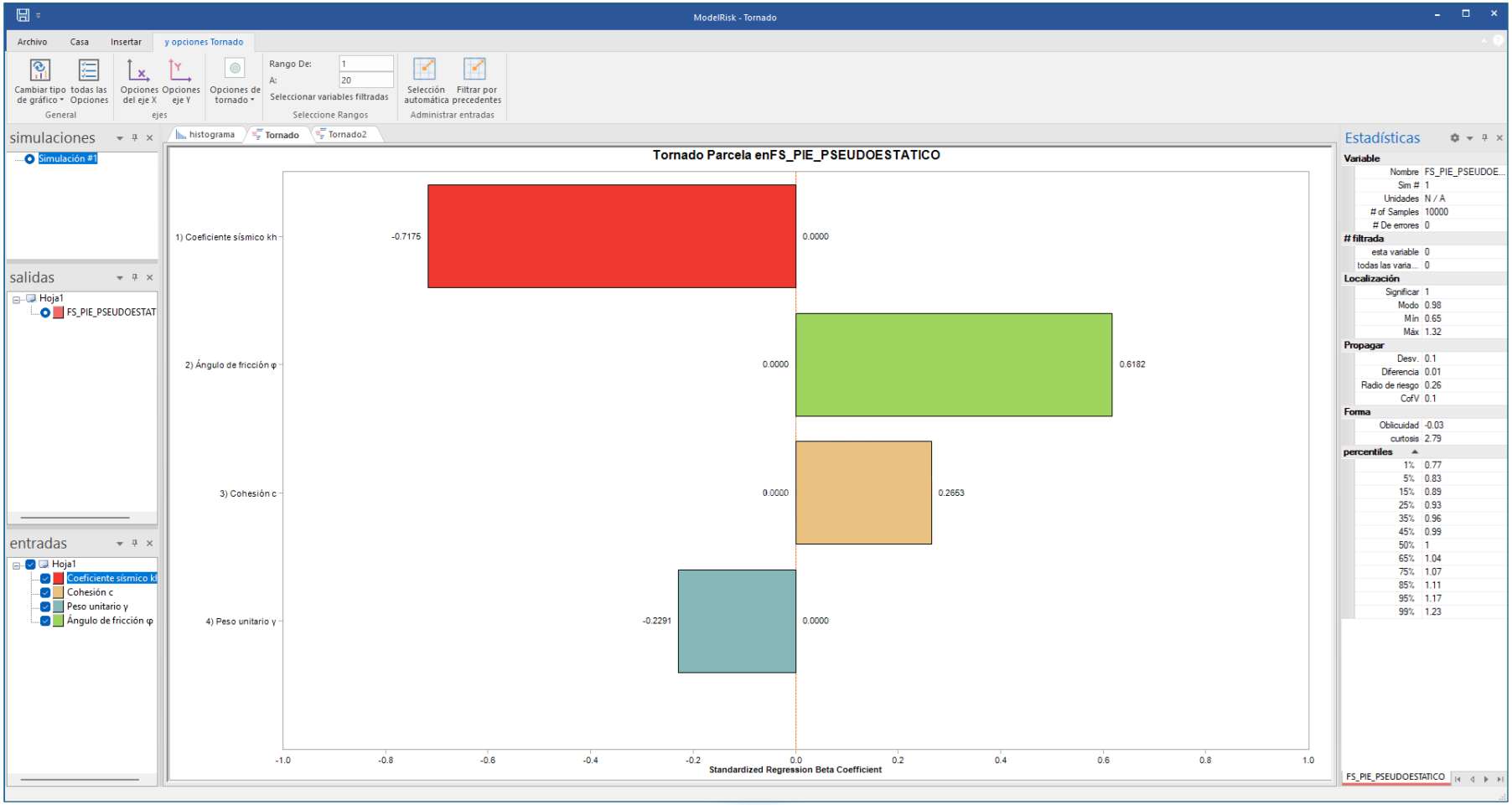
Nota. Resultados obtenidos mediante ModelRisk a partir de 10 000 realizaciones Monte Carlo del escenario indicado. La correlación de rango, β estandarizado y contribución proporcional se interpretan como indicadores de sensibilidad de la respuesta simulada dentro de los rangos adoptados; no se emplean como pruebas de significancia poblacional.

Figura A17-16. Correlación de rango - pie del talud - pseudoestática



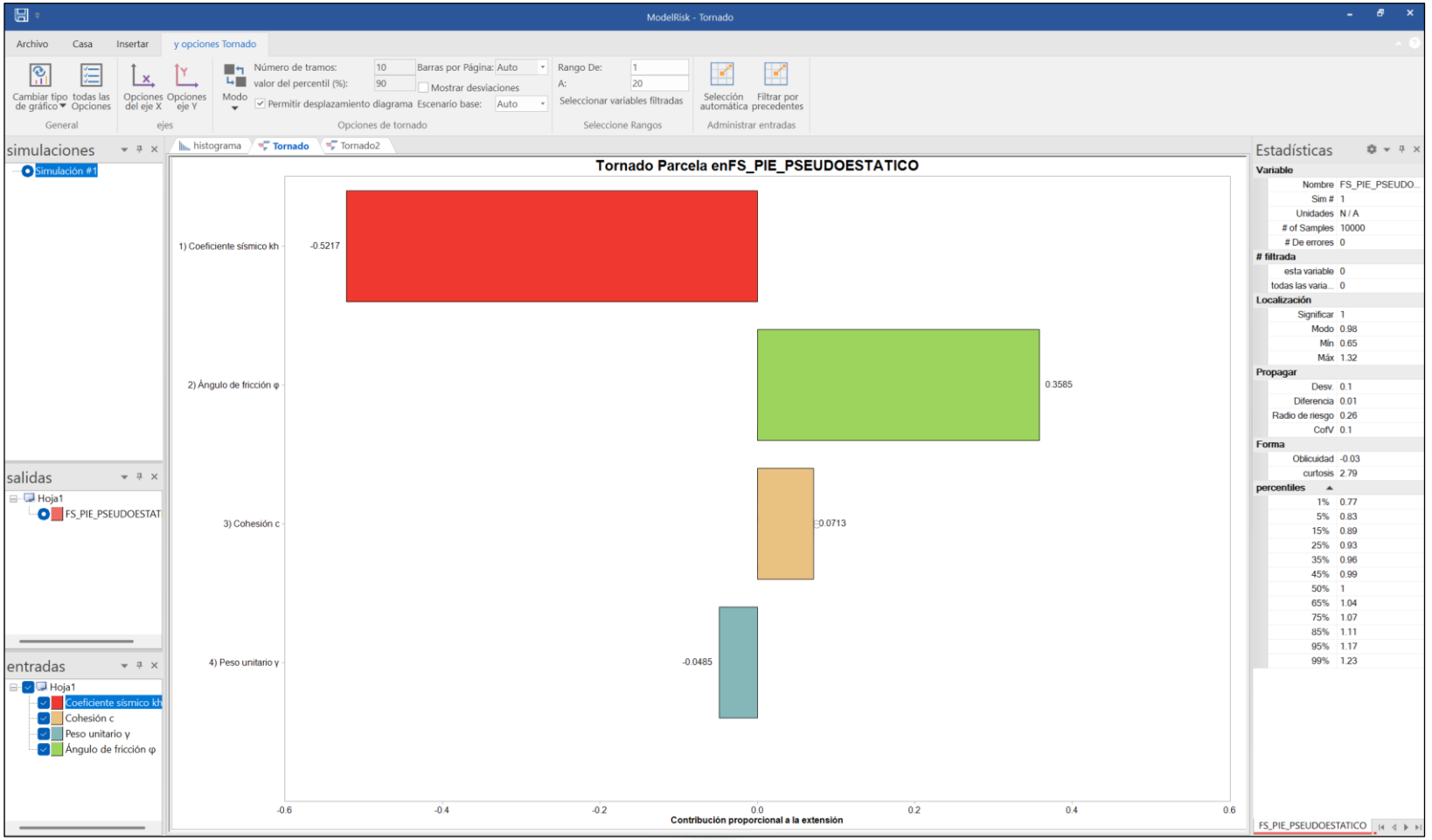
Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la correlación de rango entre las variables de entrada y el factor de seguridad para el pie del talud bajo condición pseudoestática. Elaboración propia a partir de ModelRisk.

Figura A17-17. Coeficientes beta estandarizados - pie del talud - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a los coeficientes beta estandarizados para el pie del talud bajo condición pseudoestática. Los valores se utilizan para comparar la magnitud relativa de la sensibilidad de las entradas dentro del modelo simulado.

Figura A17-18. Contribución proporcional - pie del talud - pseudoestática



Nota. Salida de ModelRisk correspondiente a la contribución proporcional de las variables de entrada a la propagación de la respuesta simulada para el pie del talud bajo condición pseudoestática.

El coeficiente sísmico horizontal presentó la mayor sensibilidad relativa, con β estandarizado = -0.7175 y una contribución proporcional de 52.17 %, seguido por el ángulo de fricción interna con β = 0.6182 y 35.85 %. La cohesión y el peso unitario contribuyeron con 7.13 % y 4.85 %, respectivamente. Los signos indican relación directa de c y φ e inversa de γ y kh con el factor de seguridad.

Síntesis interpretativa del respaldo estadístico

En condición estática, la sensibilidad relativa obtenida mediante ModelRisk indicó predominio del peso unitario en la cresta y del ángulo de fricción interna en la zona media y el pie del talud. En condición pseudoestática, la cresta mostró una sensibilidad distribuida entre c, φ, γ y kh, mientras que en la zona media y el pie predominó kh, seguido principalmente de φ. Esta jerarquización complementa el análisis determinístico de sensibilidad desarrollado en el Capítulo IV y debe interpretarse exclusivamente dentro de las secciones, rangos y distribuciones de escenario adoptados.