

FACULTAD DE INGENIERÍA

Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil

Tomás Fernando Garcés Gálvez

Asesor: Dr. Ing. William Segundo Araujo Navarro

Piura, noviembre de 2023



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Tomás Fernando Garcés Gálvez, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI N° 74390780.

Declaro bajo juramento que:

 Soy autor del trabajo final titulado:
 "Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes"

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis¹ para optar el Título profesional² de Ingeniero civil.

- 2. Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI N° Escribir número
- 3. La asesoría del trabajo estuvo a cargo de:
 - William Segundo Araujo Navarro, identificado con DNI Nº 47587927
 - Haga clic o pulse aquí para escríbir texto, identificado con DNI N° Escribir número
 - Haga clic o pulse aquí para escribir texto, identificado con DNI Nº Escribir número
- 4. El texto de mi trabajo final respeta y no vulnera los derechos de terceros o de ser el caso derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para la cual he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas.
- 5. El texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico.
- 6. La investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.
- 7. Declaro que mi trabajo final cumple con todas las normas de la Universidad de Piura.

El incumplimiento de lo declarado da lugar a responsabilidad del declarante, en consecuencia; a través del presente documento asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

Fecha: 25/09/2023.

Firma del autor optante³

¹ Indicar si es tesis, trabajo de investigación, trabajo académico o trabajo de suficiencia profesional.

² Grado de Bachiller, Título de profesional, Grado de Maestro o Grado de Doctor ³ Idéntica a DNI, no se admite digital salvo certificado.

El suelo es el límite



Para Ruth, Oscar y Nathaly, con amor



Resumen

En la presente investigación se evalúa la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, mediante métodos probabilísticos, en el análisis de la estabilidad de taludes sintéticos, diseñados sobre la base de un caso de referencia, y, posteriormente, se desarrolla un análisis complementario de un talud real, siguiendo la misma metodología de estudio en ambos casos.

Este trabajo se limitó al análisis bidimensional de taludes conformados por suelo homogéneo, para escenarios de mínima y máxima incertidumbre, evaluados en condiciones estática y pseudoestática, basados en métodos de equilibrio límite y criterio de rotura de Mohr-Coulomb. Se emplearon las metodologías de Spencer y Morgenstern-Price para la determinación de factores de seguridad, así como los métodos de hipercubo latino (LHS) y primer orden segundo momento (FOSM) para el desarrollo del enfoque probabilístico, en el cálculo de valores de probabilidades de falla e índices de confiabilidad asociados a estas, en cada escenario simulado.

Las modelaciones y análisis se desarrollaron mediante el software Slide v6.0, y sobre la base de la información generada, se empleó el software Excel para la aplicación del método FOSM. La hipótesis de trabajo expresa que un talud considerado estable, no necesariamente resulta confiable, por lo que es conveniente incorporar al análisis tradicional el enfoque probabilístico.

Los resultados permitieron confirmar la hipótesis planteada, pues se identificaron casos en donde se reportaron factores de seguridad que cumplían los requerimientos de estabilidad, según las normas, y, sin embargo, presentaban valores de considerable probabilidad de falla. Además, se determinó que no se aprecian diferencias significativas entre los factores de seguridad determinístico y probabilístico, por lo que resulta imposible advertir el efecto de la incertidumbre si se prescinde de la información adicional que proporciona el enfoque probabilístico, es decir, índices de confiabilidad asociados a valores de probabilidad de falla. Asimismo, se verificó que los parámetros de mayor influencia sobre la estabilidad de los taludes son la cohesión y ángulo de fricción interno, en ese orden de relevancia. Sin embargo, este orden puede verse alterado en escenarios de máxima incertidumbre y condición sísmica. Finalmente, la contribución del peso de suelo puede considerarse despreciable, pues representa menos del 5% del peso total de la variabilidad del factor de seguridad en los taludes analizados.

Tabla de contenido

Intro	ducción	13
Capít	ulo 1	14
Prese	ntación	14
1.1	Problemática	14
1.1.1	Situación específica	17
1.2	Alcances	
1.3	Justificación	
1.4	Objetivos	19
Capít	ulo 2	20
Marc	o teórico	20
2.1	Antecedentes	20
2.1.1	Publicaciones nacionales	22
2.1.2	Publicaciones internacionales	24
2.2	Bases teóricas	26
2.2.1	Mecánica de suelos	27
2.2.2	Génesis del suelo	27
2.2.3	Estabilidad de taludes	
2.2.4	Confiabilidad geotécnica	42
2.2.5	Software Slide v6.0	50
2.3	Bases normativas	52
2.4	Hipótesis	53
Capít	ulo 3	54
Marc	o metodológico	54
3.1	Modelos sintéticos	54
3.1.1	Investigación	55
3.1.2	Caracterización	55
3.1.3	Modelación	56
3.2	Casos de estudio	58
3.2.1	Talud sintético	

3.2.2	Talud real	65			
3.3	Limitaciones				
Capít	ulo 4	68			
Result	tados y discusión	68			
4.1	Estabilidad de taludes	68			
4.1.1	Estabilidad de talud María Reiche	74			
4.2	Confiabilidad de taludes	79			
4.2.1	Confiabilidad de talud María Reiche				
4.3	Sensibilidad de variables	95			
4.3.1	Sensibilidad de variables en talud María Reiche	101			
Concl	usiones				
Recon	nendaciones	104			
Glosa	rio	105			
Refere	encias				
Apéndices					
Apéndice A análisis estáticos, taludes sintéticos (Slide - LHS)					
Apéno	dice B análisis pseudoestáticos, taludes sintéticos (Slide - LHS)				
Apéndice C análisis estáticos, taludes sintéticos (Excel - FOSM)					
Apéndice D análisis pseudoestáticos, taludes sintéticos (Excel - FOSM)148					
Apéndice E análisis estáticos, talud María Reiche (Slide - LHS)					
Apéndice F análisis pseudoestáticos, talud María Reiche (Slide - LHS)					
Apéndice G análisis de talud María Reiche (Excel - FOSM)157					
Anexos					
Anexo A resumen de valores típicos de coeficientes de variación159					
Anexo B fórmulas para cálculo de coeficiente sísmico160					

Lista de tablas

Tabla 1 Secuelas de eventos naturales de mayor impacto en el Perú (1970-2006)	15
Tabla 2 Comparación entre sistemas AASHTO y SUCS	30
Tabla 3 Clasificación del suelo según tamaño de partículas	31
Tabla 4 Características de los métodos de análisis de estabilidad	40
Tabla 5 Valores típicos de coeficientes de variación	43
Tabla 6 Niveles de desempeño asociados a índices de confiabilidad	46
Tabla 7 Cálculos requeridos según método probabilístico	46
Tabla 8 Factores de seguridad mínimos según normativas	52
Tabla 9 Normativas nacionales e internacionales	53
Tabla 10 Propiedades geotécnicas del talud de referencia	54
Tabla 11 Parámetros geométricos de taludes sintéticos	56
Tabla 12 Propiedades geotécnicas de taludes sintéticos	56
Tabla 13 Parámetros sísmicos de taludes sintéticos	56
Tabla 14 Condiciones de borde en taludes sintéticos	57
Tabla 15 Configuración de software Slide para análisis de taludes sintéticos	57
Tabla 16 Distribución de probabilidades de parámetros geotécnicos	58
Tabla 17 Parámetros geométricos de talud sintético – Caso 1	58
Tabla 18 Propiedades geotécnicas de talud sintético – Caso 1	59
Tabla 19 Parámetros sísmicos de talud sintético – Caso 1	59
Tabla 20 Resultados de Slide, taludes sintéticos en condición estática – Caso 1	64
Tabla 21 Resultados de Excel, por Morgenstern-Price, método FOSM – Caso 1	65
Tabla 22 Parámetros geotécnicos de talud María Reiche	66
Tabla 23 Parámetros sísmicos de talud María Reiche	66
Tabla 24 Número de escenarios de análisis de taludes sintéticos	68
Tabla 25 Resultados de estabilidad de taludes sintéticos	69
Tabla 26 Resultados de estabilidad de talud María Reiche	78
Tabla 27 Confiabilidad de taludes sintéticos, condición estática (LHS)	81
Tabla 28 Confiabilidad de taludes sintéticos, condición pseudoestática (LHS)	82
Tabla 29 Verificación de estabilidad y confiabilidad de taludes sintéticos	83
Tabla 30 Resultados de confiabilidad de taludes sintéticos, Morgenstern-Price (FOSM)	84

Tabla 31 Índices de confiabilidad de taludes sintéticos, Morgenstern-Price (LHS, FOSM)	85
Tabla 32 Confiabilidad de talud María Reiche, por Spencer (LHS)	91
Tabla 33 Confiabilidad de talud María Reiche, por Morgenstern-Price (LHS)	91
Tabla 34 Confiabilidad de talud María Reiche, por Morgenstern-Price (FOSM)	94
Tabla 35 Índices de confiabilidad, talud María Reiche, por Morgenstern-Price	94
Tabla 36 Contribución de parámetros sobre varianza de FS, taludes sintéticos	96
Tabla 37 Contribución de parámetros sobre varianza de FS, talud María Reiche	101



Lista de figuras

Figura 1 Mapa del Perú de zonas susceptibles a movimientos en masa17
Figura 2 Áreas de ocurrencia frecuenta de deslizamientos en el mundo21
Figura 3 Suelo natural (a) y suelo idealizado (b)32
Figura 4 Nomenclatura de taludes y laderas
Figura 5 Esquema geomorfológico y movimientos asociados
Figura 6 Métodos de análisis de estabilidad de taludes
Figura 7 División de masa deslizante y fuerzas actuantes en dovelas
Figura 8 Distribución de probabilidad típica de R y Q44
Figura 9 Densidad de probabilidad para margen $M = 0$
Figura 10 (a) Muestreo de Monte Carlo
Figura 11 (b) Muestreo estratificado de hipercubo latino
Figura 12 Geometría simple de talud de referencia55
Figura 13 Esquema de las condiciones de borde para taludes sintético
Figura 14 Resumen del proyecto de análisis, caso 160
Figura 15 Caracterización del talud para escenario de mínima incertidumbre, caso 160
Figura 16 Caracterización del talud para escenario de máxima incertidumbre, caso 161
Figura 17 Condiciones de sismo para talud sintético, caso 1
Figura 18 Condiciones de borde y enmallado en talud sintético, caso 1
Figura 19 Configuración de métodos numéricos en talud sintético, caso 1
Figura 20 Configuración de muestreo estadístico en talud sintético, caso 1
Figura 21 Resultados por Spencer, escenario de mínima incertidumbre, caso 1
Figura 22 Vista real de talud María Reiche
Figura 23 Propuesta de talud María Reiche
Figura 24 Relación FS, condición estática (método M-P)70
Figura 25 Relación FS, condición pseudoestática (método M-P)71
Figura 26 Relación FSd y H, condición estática (método M-P)71
Figura 27 Relación FSd y H, condición pseudoestática (método M-P)72
Figura 28 Relación FSm y H, condición estática (método M-P)72
Figura 29 Relación FSm y H, condición pseudoestática (método M-P)73

Figura 30 Talud María Reiche, condición estática, mínima incertidumbre (Spencer)74					
Figura 31 Talud María Reiche, condición estática, mínima incertidumbre (M-P)74					
Figura 32 Talud María Reiche, condición estática, máxima incertidumbre (Spencer)75					
Figura 33 Talud María Reiche, condición estática, máxima incertidumbre (M-P)75					
Figura 34 Talud María Reiche, condición pseudoestática, mínima incertidumbre (Spencer).76					
Figura 35 Talud María Reiche, condición pseudoestática, mínima incertidumbre (M-P)76					
Figura 36 Talud María Reiche, condición pseudoestática, máxima incertidumbre (Spencer) 77					
Figura 37 Talud María Reiche, condición pseudoestática, máxima incertidumbre (M-P)77					
Figura 38 FS (promedio) - Caso 2C, mínima incertidumbre, estático					
Figura 39 FS (desviación estándar) - Caso 2C, CV mín., estático80					
Figura 40 Probabilidad de falla - Caso 2C, CV mín., estático					
Figura 41 Relación entre RI-n y PF, taludes sintéticos					
Figura 42 Relación RI-n (FOSM) y RI-n (LHS), taludes sintéticos					
Figura 43 FS (promedio) – Análisis estático, mínima incertidumbre					
Figura 44 FS (promedio) – Análisis estático, máxima incertidumbre					
Figura 45 FS (desviación estándar) – Estático, CV mín					
Figura 46 FS (desviación estándar) – Estático, CV máx					
Figura 47 FS (promedio) – Pseudoestático, CV mín					
Figura 48 FS (promedio) – Pseudoestático, CV máx					
Figura 49 FS (desviación estándar) - Pseudoestático, CV mín					
Figura 50 FS (desviación estándar) - Pseudoestático, CV máx90					
Figura 51 Probabilidad de falla – María Reiche, CV mín., estático92					
Figura 52 Probabilidad de falla – María Reiche, CV máx., estático					
Figura 53 Probabilidad de falla María Reiche, CV mín., pseudoestático93					
Figura 54 Probabilidad de falla María Reiche, CV máx., pseudoestático93					
Figura 55 Sensibilidad de parámetros, CV mín. (estático)					
Figura 56 Sensibilidad de parámetros, CV máx. (estático)97					
Figura 57 Influencia de parámetros, CV mín. (estático)					
Figura 58 Influencia de parámetros, CV máx. (estático)98					
Figura 59 Sensibilidad de parámetros, CV mín. (pseudoestático)					
Figura 60 Sensibilidad de parámetros, CV máx. (pseudoestático)					

Figura 61 Influencia de parámetros, CV mín. (pseudoestático)	
Figura 62 Influencia de parámetros, CV máx. (pseudoestático)	
Figura 63 Talud María Reiche - Sensibilidad, estático	
Figura 64 Talud María Reiche - Sensibilidad, pseudoestático	



Introducción

La incertidumbre es un elemento inherente de todos los sistemas de ingeniería. Su adecuado tratamiento depende del reconocimiento de las condiciones iniciales a considerar en la simplificación y modelamiento de la realidad observada, de la experiencia del profesional para definir el nivel de prioridad en la valoración del problema a resolver, y de las herramientas disponibles en la aplicación de la metodología seleccionada, según los criterios propuestos por diversos autores a través del tiempo; a partir de allí, es posible diseñar soluciones factibles, de ser necesarias, que se ajusten a las limitaciones de cada escenario, procurando su efectividad.

En ese sentido, la presente investigación evalúa la estabilidad de taludes sintéticos mediante un enfoque de análisis probabilístico, el cual considera la incertidumbre en la variabilidad de parámetros geotécnicos, con el objeto de estudiar el comportamiento de taludes y su sensibilidad frente a diversas condiciones. La contribución que se pretende lograr con este trabajo es la mejora del análisis de taludes otorgándole mayor relevancia al tratamiento estadístico del problema, y la posterior gestión del riesgo en la inestabilidad de los mismos, ofreciendo de ese modo una ventaja en la respuesta frente a potenciales peligros asociados.

Motivado por lo anteriormente señalado presento la tesis titulada "Evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes", y expreso mi especial agradecimiento y consideración a mis padres, por su incondicional apoyo; a mi asesor de tesis, por su paciencia, y a la UDEP, por formarme.

Capítulo 1

Presentación

En este capítulo se presenta la problemática entorno a los peligros que desencadenan los procesos geodinámicos y el cambio climático, la intervención humana en el desarrollo de infraestructura y los riesgos que supone la ineficiente gestión y prevención de los mismos a escala global y nacional. A partir de allí, se describe el problema de inestabilidad de taludes a tratar en esta investigación y los alcances respectivos, delimitando los aspectos de interés relacionados a este tópico. Además, se exponen las motivaciones que justifican la especial atención a este tema y, finalmente, se plantean los objetivos que se pretenden alcanzar.

Es preciso señalar que distintos autores proponen diversos enfoques para abordar la problemática aquí descrita, el tratamiento de la inestabilidad de taludes y los riesgos asociados a esta. Sin embargo, todos coinciden en la importancia de ocuparse de cada escenario en forma independiente, aun cuando las condiciones, características y limitaciones entre uno y otro sean similares. La incertidumbre presente en el contexto geológico y geotécnico compromete la adecuación de modelos en el universo de la ingeniería, y en ese sentido resulta imprescindible optar por medios racionales que permitan cuantificarla, representarla y analizarla.

1.1 Problemática

Procesos geodinámicos y cambio climático. Las transformaciones del tipo mecánico, químico o biológico generadas por agentes y fuerzas naturales que intervienen en el interior de la corteza terrestre, desde el movimiento de placas tectónicas y concentraciones de calor, hasta las que ocurren en la superficie, relacionadas al viento, el agua o la gravedad, y sus combinaciones, han permitido la formación de la Tierra y el modelamiento de su relieve; todos estos procesos geodinámicos nunca se detienen y son la fuente continua del desarrollo de eventos naturales que impactan significativamente en la vida del hombre. Según la OEA (1993), las consecuencias de este dinamismo son las principales responsables de un considerable número de víctimas mortales cada año, importantes pérdidas económicas, destrucción de todo tipo de infraestructuras y la interrupción de diversas actividades.

De acuerdo a *The Economist* (2017) el número de desastres naturales, desde 1970 en adelante, se ha cuadruplicado en todo el mundo a más de 400 eventos por año.

Sin embargo, dichos valores contrastan con la estrepitosa caída en el conteo de muertes provocadas por estos fenómenos, probablemente gracias a los planes de prevención implementados.

En el Perú, la realidad frente a los peligros naturales es compleja, debido no solo a la geodinámica o el clima, sino a aspectos económicos, sociales o a la ausencia de una cultura de prevención. Aun así, existen factores determinantes, como ser parte del Cinturón de fuego, zona donde se libera el 85% de energía del planeta (Tavera, 2018).

Aproximarnos a la historia peruana de las secuelas destructivas generadas por eventos naturales nos provee de un contexto real sobre el cual podemos reconocer la permanente actividad sísmica en todo el territorio nacional, los escasos episodios de vulcanismo, la periódica manifestación histórica de los fenómenos El Niño y La Niña, entre otros eventos recurrentes de menor magnitud, dependientes de los antes mencionados, ya sean deslizamientos, huaycos, heladas, incendios y similares (Seiner, 2002). La Tabla 1 presenta las secuelas de eventos de mayor impacto en el Perú, entre los años 1970 y 2006.

Tabla 1

Categoría	Registros	%	Decesos	%	Daños estructurales	%
Geológicos	48	30	31 849	89	150 824	43
Hidrometeorológicos	89	56	2 464	7	200 587	57
Otros	23	14	1544	4	800	0
Total	160	100	35 857	100	352 211	100

Secuelas de eventos naturales de mayor impacto en el Perú (1970-2006)

Nota. CAN (2008)

Entre los principales factores también se encuentra la ubicación geográfica, topografia, clima y morfología. El país se sitúa en la costa centro occidental de Sudamérica, entre las líneas del Ecuador y el Trópico de Capricornio, y limita al oeste con el océano Pacífico. Gracias al sistema montañoso que lo divide, la denominada cordillera de los Andes, el Perú presenta tres regiones definidas: costa, sierra y selva. La primera ocupa el 10.6% del área occidental del territorio y se extiende 2.3km; la segunda, el 31.5% del área central, de ancho variable entre 240km y 400km, y altitudes entre 1km y 7km; y la tercera, el 57.9%. Además, cuenta con 28 de los 32 climas del mundo. Asimismo, la cordillera determina 8 unidades morfológicas continentales y 5 marinas (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET], 1995).

<u>Desarrollo de infraestructura</u>. En el mundo, las actividades como la tala indiscriminada, la construcción en zonas de riesgo de inundación o sobre suelos con baja capacidad portante, el corte de taludes en proyectos viales, la modificación del cauce natural de ríos, la liberación incontrolable de gases tóxicos debido a la actividad industrial o el derramamiento de contaminantes, entre otros, genera efectos perjudiciales sobre el aire, suelo y fuentes de agua.

En el Perú, la heterogeneidad de su realidad lo convierten en un país altamente vulnerable, y junto con él su población e infraestructura. Así lo demuestran los análisis de vulnerabilidad física en el Perú, relacionados específicamente al tipo de material, calidad y uso de espacios, que nos alerta de que más del 40% del territorio presenta condiciones de alta a muy alta vulnerabilidad, y más de un tercio de la población ocupa estas zonas vulnerables. Todo esto sin contar otros tipos de infraestructura expuesta a peligros, como la red vial nacional, o la relacionada a la operación minera (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2011).

<u>Gestión del riesgo</u>. En el mundo, las poblaciones que se ubican en la posición más baja de la escala socioeconómica son las más vulnerables frente a los fenómenos naturales, según la conclusión del informe *Unbreakable* (Bangalore, *et al.*, 2017). Dichos grupos suelen afrontar el más alto grado de una difícil y lenta recuperación después de ocurrido un desastre natural. Así también, el informe *Shock Waves* reveló que los desastres ocurridos desde 1980 provocaron la muerte de más de 2 millones de personas con un costo financiero de USD 3 billones; el 75% de tales pérdidas se atribuye a desastres climáticos extremos y es probable que en el 2030 unos 100 millones de personas formen parte del sector de extrema pobreza (Bangalore, *et al.*, 2016).

Sin embargo, desde hace décadas existen organizaciones mundiales que promueven la inversión en planes de gestión de riesgos. Uno de estos organismos es el Banco Mundial (BM), el cual proporciona protección financiera, asistencia técnica y contribuye a la recuperación social e infraestructura de los países que lo requieran. En el año 2019, el BM reportó una inversión de USD 4 600 millones (Banco Mundial, 2021). En esa misma línea, el informe *Lifelines* apuntó a que una planificación integrada con una gestión del riesgo supone un beneficio de USD 4 por cada dólar invertido (Hallegate, *et al.*, 2019). En síntesis, una inadecuada gestión de riesgos, lejos de ayudar, supone mayores pérdidas.

En el Perú, según los registros históricos de fenómenos naturales, es sabido que los peligros de mayor impacto en el país son los de tipo geológico e hidrometeorológico. Una de las instituciones que contribuye a la seguridad con el desarrollo de programas y proyectos de estudios de peligros geológicos, y la divulgación de resultados y recomendaciones referidos a estos, es el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET). El trabajo de esta institución permite disponer de manera pública de las mínimas herramientas para el desarrollo de planes de prevención, reducción de riesgos y ordenamiento territorial, en el marco del Sistema Nacional de Gestión de Riesgos de Desastres (SINAGERD). Aunque no es posible predecir la ocurrencia de un evento geológico, sí lo es el reconocimiento de áreas con alto riesgo a sufrir alguno de este tipo. A razón de ello, la generación de mapas para el reconocimiento de áreas susceptibles a peligros es una tarea relevante. Un ejemplo de ello es el mapa de susceptibilidad a movimientos en masa, visto en la Figura 1 (INGEMMET, 2018).

MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD POR **MOVIMIENTOS EN MASA** Este mapa muestra las áreas propensas a movimientos en masa (deslizamientos, huaicos, caída de rocas, etc) en el territorio nacional. A menor escala junto con el mapa de peligros determinan las zonas críticas ante peligros geológicos. Se cuenta también con mapas regionales y por cuencas. LEYENDA Muy bajo: terrenos con pendientes menores a 5 ". Zonas donde los mavimientos en mosa, tienen pocos condiciones para formarse. Bojo: zonas llanas a ligetamente inclinadas (10° a 20°) donde las probabilidades de que se generen vimientos: en moso són meno Media: corresponde a terrentas cuyas pendiantes vorios entre 20 y 30°, rocas maderadamente alteradas con escaso marten priderite menerite a l' forsa per contenido de agua; dande los movimientos en masa se generan en épocas de lluvias exceptionales Alta: las condiciones del terreno son fovorables o generar movimientos en moso. Los pendientes vorian entre 30° y 45°, los racas se encuentron alteradas y fracturadas y presentan indicios de conten Muy Alta: las condiciones del terreno son muy favorables para generas movimientos en masa. Laderas con pendientes entre 25° v 45°, rocos intensamente alteradas y fracturados con alto contenido de agua.

Mapa del Perú de zonas susceptibles a movimientos en masa

Nota. INGEMMET (2018)

1.1.1 Situación específica

Figura 1

La realidad nacional nos presenta un escenario que experimenta continuos cambios debido a las características naturales antes mencionadas y condiciones inestables suficientes para el desarrollo de movimientos en masas, en particular los relacionados a fallas de taludes. Este tipo de fenómenos compromete seriamente la vida de las personas, causa pérdidas materiales y mortales o interrumpe el desarrollo de cualquier actividad u operación.

La infraestructura vial del Perú es uno de los sistemas de caminos que más se ve afectado por la inestabilidad de taludes y las consecuencias del movimiento de masa de suelo. Según el reporte oficial actualizado al año 2021, el Perú cuenta con una red vial total que se extiende cerca de 176 000 km, de los cuales el 97% se ubica en zonas susceptibles a potenciales deslizamientos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC], 2021).

La evaluación de la estabilidad de taludes es el paso fundamental para contrastar escenarios y diseñar medidas preventivas para reducir el riesgo de falla, pero ello requiere la adopción de nuevos enfoques de análisis, respuestas más confiables y mejores soluciones.

1.2 Alcances

El presente estudio se limita al análisis bidimensional de la estabilidad de taludes sintéticos conformados por suelo homogéneo, analizados en las condiciones estática y pseudoestática, mediante los LEM¹ de Spencer y Morgenstern-Price, y los métodos probabilísticos de LHS y FOSM; la evaluación solo contempla superficies de falla circulares. No se consideró el efecto de la precipitación, la existencia de sobrecargas estáticas, la ocurrencia de deformaciones, ni las variaciones espacio-temporal de propiedades geotécnicas. La evaluación pseudoestática para este estudio se efectuó para la condición más crítica.

A partir del modelo de referencia se varió arbitrariamente la geometría del talud, mientras que para representar la incertidumbre de parámetros geotécnicos (ángulo de fricción interna, cohesión y peso específico del suelo), se les asignó a tales variables una función de distribución normal, y se incorporó a estas un coeficiente de variación (CV), obtenido de la literatura, el cual relaciona desviación estándar y media para cada parámetro. Los modelos analizados se sometieron a 10000 simulaciones numéricas para determinar los factores de seguridad (FS), tanto para los análisis determinísticos como probabilísticos.

1.3 Justificación

El potencial peligro geodinámico relacionado a la inestabilidad de taludes supone considerables riesgos que abarcan el desarrollo de movimientos de masas de suelo, para lo cual la adopción de adecuados métodos de estabilización permitiría reducirlos (Suárez, 2009). Sin embargo, en el ejercicio profesional se prescinde con frecuencia de algunos factores importantes en la evaluación de este tipo de problemas, como la valoración de la incertidumbre en cada caso particular, comprometiendo la interpretación de los resultados.

En la práctica común los análisis de estabilidad se basan en métodos determinísticos (Morgenstern-Price, Spencer, Bishop, etc.) y no contemplan las fuentes de incertidumbre presentes en el sistema a analizar, entre los que comprende la variación de las propiedades del suelo, según la ubicación y tiempo en que son obtenidas las muestras, la estimación de las mismas a través de ensayos de laboratorio y potenciales errores relacionados a la medición, calibración de los equipos, destreza humana, entre otros (Tang, *et al.*, 1976; Alva, 1994). Todo ello nos obliga a ser cautelosos en la valoración de cada análisis de estabilidad efectuado.

Las consecuencias derivadas de la ocurrencia de movimientos en masa se presentan con frecuencia en zonas de accidentada topografía y pendientes pronunciadas, y los estragos que dejan a su paso producen cambios significativos. He allí la importancia de esta investigación, la cual recae sobre dos aspectos fundamentales: la necesidad de comprender conceptualmente los movimientos en masa para lograr simplificarlos y simularlos, y la urgencia de abordar dicho fenómeno mediante un enfoque probabilístico que garantice mayor confiabilidad en el diseño de soluciones que se desprendan del adecuado análisis e interpretación de resultados.

¹ Limit equilibrium methods (métodos de equilibrio límite)

En ese sentido, este trabajo se enfoca en la evaluación de la incertidumbre existente en la determinación de los parámetros geotécnicos para el estudio de la estabilidad de taludes sintéticos, desde un enfoque probabilístico, incorporando conceptos y métodos estadísticos que permitan considerar la incertidumbre en los cálculos para el muestreo de datos, la determinación de probabilidades de falla e índices de confiabilidad asociados a factores de seguridad, determinar la sensibilidad entre los parámetros geotécnicos y describir una metodología de análisis de taludes, que incorpora el uso del software Slide v6.0 y Excel 2016.

1.4 Objetivos

General:

Evaluar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos mediante métodos probabilísticos en el análisis de la estabilidad de taludes.

Específicos:

Definir la geometría y caracterizar las propiedades geotécnicas y condiciones de contorno de los modelos de taludes sintéticos propuestos para los análisis de estabilidad en función de un caso de referencia de la literatura.

Determinar la confiabilidad y probabilidad de falla de taludes sintéticos mediante la aplicación de los métodos probabilísticos de Hipercubo Latino y Primer Orden Segundo Momento, y compararlos con los métodos de evaluación determinísticos.

RENS

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se presenta el estado del arte en el análisis de la estabilidad de taludes, destacando los enfoques, metodologías y recursos empleados por diversos autores en el tratamiento del tema señalado; asimismo, se destacan las principales conclusiones y algunos planteamientos sobre estudios futuros. Además, se describen las bases teóricas sobre las cuales se sustenta este trabajo, se especifican algunas consideraciones generales sobre normativas nacionales e internacionales, resaltando su importancia y aplicación, y finalmente, se formula la hipótesis a partir de la bibliografía estudiada.

La valoración de los resultados de investigaciones anteriores, y la discusión de las consideraciones entre los criterios adoptados por distintas normas internacionales respecto a las nacionales, nos proveen de un mejor panorama para abordar el análisis de la estabilidad de taludes. El eje común entre estas investigaciones y estudios recientes recae en la importancia de la incorporación de la incertidumbre en los análisis, la estimación del riesgo y el nivel de confiabilidad de los taludes. Por ello, las diversas metodologías de trabajo posibilitan la obtención de rangos de respuesta que contribuyen a mejorar la elección de soluciones.

2.1 Antecedentes

La ocurrencia de eventos naturales a escala global ha ido en aumento en las últimas décadas y las consecuencias que dejaron a su paso han sido devastadoras. Estos escenarios están estrechamente relacionados con la variación precipitada de la temperatura del planeta; los informes publicados a nivel mundial del costo social y financiero que provocan tales fenómenos así lo revelan (BM, 2021; CB, 2017; WWF, 2017).

De entre los fenómenos en común que desencadenan los procesos geodinámicos e hidrometeorológicos, y que comprenden el mayor número de desastres, se encuentran los movimientos en masa. Estos constituyen una de las amenazas que más daño han ocasionado, ya sean pérdidas humanas o destrucción de estructuras, máxime en las sociedades ubicadas en la escala más baja del nivel socioeconómico (Fredlund, 2007; Bangalore, et al., 2017).

Los sismos y las lluvias son los principales factores desencadenantes de movimientos en masa, y los efectos que generan abarcan desde el bloqueo de vías e interrupción de servicios, hasta la destrucción de infraestructura, e incluso inundaciones debido al colapso de diques y obras similares; es por ello que su ocurrencia genera gran impacto. Los registros dan cuenta de algunos eventos bastante conocidos, debido a la magnitud del desastre provocado, relacionados a deslizamientos de tierra: el producido en 1963, en el embalse de Vaiont, Europa, que provocó la muerte de más de 3 000 personas; la avalancha en el Huascarán, Perú, debido a un terremoto en 1970, que provocó cerca de 18 000 muertes; o el evento de 1920, en Kansu, China, que generó 200 000 pérdidas humanas (Instituto Geológico y Minero de España [IGME], 1987).

Las áreas de ocurrencia de este tipo de desastres coinciden en su mayoría con las zonas en las que se ubican las principales cadenas montañosas en el mundo (Suárez, 2009), como se aprecia en la Figura 2. Esta coincidencia nos revela que las amenazas por deslizamiento guardan relación con la topografía accidentada. Es evidente que existen regiones particulares de entre toda el área de cadenas montañosas donde hay mayor probabilidad de que ocurran deslizamientos debido a que en dichas regiones confluyen los principales elementos desencadenantes: relieve, sismicidad, meteorización y precipitaciones.

Figura 2

Áreas de ocurrencia frecuenta de deslizamientos en el mundo



Nota. Adaptado de Suárez (2009)

La identificación de estas áreas es fundamental como parte de toda política de prevención y atención de desastres (INGEMMET, 2009), porque es la base sobre la cual es posible gestionar el riesgo y plantear soluciones para su control, mediante recolección y procesamiento de datos para la generación de mapas de peligros potenciales clasificados según niveles de vulnerabilidad y susceptibilidad a deslizamientos, y la posterior ejecución de medidas de mitigación, que abarcan el diseño de normativas y divulgación de información.

Los deslizamientos ocurren, en principio, por la inestabilidad de taludes. Esta inestabilidad se debe a factores condicionantes, en cuanto a forma física y propiedades del suelo, y desencadenantes, que precipitan la falla del suelo a causa de eventos naturales. Una posible clasificación de estos problemas de inestabilidad se subdivide en dos categorías: fallas asociadas a taludes naturales, y fallas asociadas a taludes artificiales o creados por el hombre (Fredlund D. , 2007). En el Perú, los deslizamientos ocurren porque el agua y eventos sísmicos comprometen la estabilidad de las laderas (Instituto Geofísico del Perú [IGP], 2020).

El estudio de taludes es probablemente el área de la geotecnia donde la incertidumbre domina todo tipo de análisis. Estos abarcan muchos componentes a considerar en el cálculo de la estabilidad, ya sean factores geológicos, variabilidad espacial de las propiedades del suelo, las cambiantes condiciones ambientales, los diversos mecanismos de falla, las simplificaciones de la realidad para su modelamiento, las limitaciones en los modelos geotécnicos, los errores humanos en la medición de parámetros, diseños y construcción, la escasa información disponible o los enfoques adoptados para estudiar la seguridad de los taludes son algunos de ellos (El-Ramly H., 2001). Todo ello supone una innumerable combinación de condiciones y limitaciones a tomar en cuenta en los análisis de taludes.

Aún con todo lo mencionado anteriormente, que describe en líneas generales el espectro que abarca la incertidumbre geotécnica, la evaluación de la estabilidad de taludes ha progresado significativamente en el tiempo, desde distintas áreas de estudio y para diversos fines; en todos los análisis de estabilidad el objetivo común ha sido la determinación del factor de seguridad que posee el sistema estudiado para verificar la capacidad en exceso que este presenta. Sin embargo, debido a la complejidad del tema y las particularidades antes descritas en referencia a la incertidumbre que caracteriza los distintos tipos de suelo, composición, distribución, recojo de muestras o mediciones de laboratorio, entre otros, resulta difícil optar por un único enfoque de estudio, método de análisis o consideración en los mismos.

Con el objeto de identificar los avances en este tópico se revisaron algunas investigaciones recientes en el plano nacional e internacional, expuestas en el siguiente punto.

2.1.1 Publicaciones nacionales

<u>Hernández y Torres</u> (2020), presentaron un análisis de confiabilidad del talud de la vía evitamiento, sector denominado Zarumilla, entre las progresivas km 10+480 y km 10+600, ubicado en el distrito Cercado de Lima, departamento de Lima. El análisis se basó en la incertidumbre relacionada a los parámetros hidrogeotécnicos del talud. De ese modo, determinaron la probabilidad de falla al incorporar al análisis y diseño clásico determinista el análisis probabilístico. Analizaron 4 secciones críticas en condición estática y pseudoestática, a través del software Slide. La probabilidad de falla se determinó con el método estadístico de Montecarlo.

La geometría de los taludes presentó pendientes casi verticales y alturas cercanas a los 22m. Los valores de factor de seguridad e índice de confiabilidad (RI²) fueron comparados con los resultados de análisis deterministas. Se concluyó que la propuesta inicial, a pesar de cumplir con el FS mínimo según la norma, posee un 6.57% de probabilidad de falla (PF) en condición pseudoestática. Este valor se logró reducir a 0.39% modificando el diseño inicial.

² Reliability index

<u>Ccahuana y Sánchez</u> (2019), estudiaron la estabilidad de los taludes en el tramo de la carretera Huancavelica – Lircay, entre las progresivas km 2+700 y km 2+800, ubicado en el departamento de Huancavelica. El objetivo del estudio consistió en determinar una solución viable que permita garantizar la estabilidad de los taludes. Los parámetros de resistencia del suelo se obtuvieron a través de mediciones en campo y ensayos de laboratorio. Se determinó que el macizo rocoso lo conforman calizas, margas y rocas volcánicas, cubiertos por un manto de suelo residual de 0.30m a 2.00m, clasificado como arcilla de baja plasticidad. Se analizó la estabilidad de los taludes en condición estática y pseudoestática, considerando la ocurrencia de precipitaciones, mediante el software Slide 6.0, bajo el criterio de Mohr-Coulomb para el suelo residual, y de Hoek y Brown en el macizo rocoso, y los métodos de equilibrio límite de Spencer, Bishop simplificado y Morgenstern-Price. Los resultados arrojaron que los taludes son inestables en temporadas de precipitaciones, y en este caso la solución viable para la estabilización de los mismos es el uso de geosintéticos y revegetación.

<u>Huallpa</u> (2019), identificó y evaluó los factores geotécnicos que generan la inestabilidad de la ladera de la quebrada de Qolcohuaycco, en el distrito de San Sebastián, ubicado en el departamento del Cusco. Se determinaron los parámetros geotécnicos en condición natural y saturada, e incremento de altura generada por la erosión del talud, y se comprobó si las precipitaciones pluviales saturaban el suelo. Todas estas consideraciones fueron simuladas, mediante el software Slide, para el análisis de 2 secciones críticas. No se evaluó la influencia sísmica. Con base en los estudios y análisis, a través de los LEM de Spencer, Jambú y Morgenstern-Price, se concluyó que el talud es estable y los parámetros más influyentes en la estabilidad son el ángulo de fricción, cohesión, permeabilidad, peso específico y porosidad, en ese orden de relevancia. Los FS obtenidos resultaron en un rango de valores entre 1.28 y 1.41.

P)

<u>Sackschewski</u> (2017), presentó el análisis de taludes inestables, de riesgo moderado a alto, identificados durante la supervisión del proyecto referido al corredor vial Lima – Canta – Huayllay – Dv. Cochamarca – Empalme PE 3N, en el tramo Canta – Huayllay, entre las progresivas del km 102 y km 110, ubicado en la provincia de Canta, en el departamento de Lima. Los datos recopilados para el estudio de la estabilidad provienen de referencias técnicas, observaciones geológicas y geotécnicas en campo, ensayos in-situ y ensayos de laboratorio, tanto para suelos como para rocas.

Los análisis se efectuaron mediante el software Slide 6.0, bajo los criterios de Mohr-Coulomb, para el suelo, y de Hoek y Brown, para el macizo rocoso. La evaluación pseudoestática consideró los coeficientes de aceleración sísmica horizontal y vertical de 0.17g y 011g, respectivamente. El enfoque de análisis ejecutado fue el determinístico. Los resultados determinaron que en algunos tramos de la vía la estabilidad mejora mediante la reconformación del talud, procesos de sellado de grietas, control de filtraciones, construcción de cunetas de coronación y la adopción de banquetas.

2.1.2 Publicaciones internacionales

<u>Falamaki, et al.</u> (2021), evaluaron la estabilidad del talud de un fallido vertedero de desechos sólidos a cielo abierto, ubicado en Irán, mediante un enfoque de análisis probabilístico. El análisis consideró la evaluación de la estructura en dos etapas, durante el proceso constructivo y una vez finalizado este, además de la posibilidad de infiltración de agua y/u ocurrencia de sismos severos. Asimismo, la incertidumbre estudiada abarcó los parámetros de resistencia al corte del material de desecho, su peso unitario y la variabilidad de las fuerzas sísmicas en el caso de los análisis pseudoestáticos. Los resultados de la investigación indicaron que en la etapa de construcción la estructura analizada es estable bajo cargas estáticas y sísmicas, y la probabilidad de falla es cero; en el caso de la evaluación con infiltración excesiva los autores demostraron que existe un alto riesgo de falla. Por otro lado, en la etapa postconstrucción, se determinó que para ángulos de pendientes entre 40° y 45°, y alturas de talud entre 35m y 50m, el vertedero es estable en condición estática y sísmica.

<u>Pérez</u> (2018), propuso un procedimiento para la evaluación de la probabilidad de falla e índice de confiabilidad de taludes críticos ante la ocurrencia de precipitaciones pluviales intensas, con el objeto de explicar y predecir el comportamiento de taludes frente a este fenómeno. Los análisis comprendieron el diseño, caracterización y simulación de un talud hipotético ubicado en el área de influencia de la estación meteorológica del Valle de Toluca, en el centro oeste del Estado de México, en México. Dicho talud fue sometido a 1 000 escenarios probables de lluvia, en un lapso de 184 días. Los cálculos de infiltración fueron ejecutados mediante el software Seep con el método de elementos finitos, mientras que el análisis de estabilidad se realizó con el software Slope, a través del método Morgenstern-Price; el desarrollo probabilístico se rigió por el método de Montecarlo. Los resultados confirmaron la hipótesis planteada: los taludes diseñados con FS=1.5, bajo criterios de confiabilidad, presentan un comportamiento inadecuado ante la ocurrencia de precipitaciones.

<u>Fernández, et al.</u> (2017), presentaron una metodología para el análisis probabilístico de la estabilidad de taludes, mediante un modelo de variables aleatorias para caracterizar los parámetros geotécnicos, con base en los datos de ensayos de corte directo a muestras de suelos residuales graníticos del Batolito Costero del Sur, en Chile.

Dichas variables fueron generadas mediante el muestreo de Montecarlo. Para ello, se estudió un caso bajo las consideraciones de suelo de talud homogéneo, conformado por material residual de granito, geometría con alturas de talud entre 2m y 10m, e inclinación de pendiente de 45° a 85°. Los análisis se ejecutaron con el software Slide 6.0, según el LEM de Morgenstern-Price, y los resultados posteriormente fueron procesados mediante el software MATLAB. Asimismo, los valores obtenidos se presentaron en función de probabilidades de falla, factores de seguridad e índices de confiabilidad. Esta investigación corroboró la relación existente entre la probabilidad de falla y los parámetros geométricos: a mayor inclinación, mayor pendiente o la combinación de ambas, se generará mayor inestabilidad en los taludes.

<u>Akbas y Huvaj</u> (2015), analizaron la estabilidad de un talud de referencia, obtenido de investigaciones anteriores, desde distintos enfoques probabilísticos de análisis, por el método de equilibrio límite (LEM), elementos finitos (FEM), y una extensión de este último, denominado método de elementos finitos aleatorios (RFEM). Posteriormente, los resultados obtenidos fueron comparados en términos de factor de seguridad (FS), probabilidades de falla (PF), índice de confiabilidad (RI) y superficie de falla. La geometría del talud evaluado se consideró como una simple, constituido por suelo homogéneo, con altura de 10m y pendiente de 1V:1H. Los parámetros geotécnicos se obtuvieron de Bhatthacharya, et al. (2013), sean estos c'=18 KN/m², ϕ '=30°, r_u = 0.2, γ =18 KN/m³, con sus respectivos coeficientes de variación y desviación estándar. Se empleó el software Phase 2 para el análisis del FEM; Slide 6.0 y GeoStudio, para el análisis del LEM, y Mrslope2D, para el análisis de RFEM. La investigación concluyó que los resultados obtenidos con diferentes métodos probabilísticos arrojaron valores muy cercanos entre sí, en términos de FS y RI.

<u>Hidalgo y Pacheco</u> (2011), evaluaron la probabilidad de falla contra deslizamientos de una estructura de contención hipotética, mediante la aplicación de dos métodos probabilísticos: el de primer orden segundo momento (FOSM) y el de estimativas puntuales (MEP). Para ello, adaptaron un modelo obtenido de Duncan (2000), y ejecutaron análisis de confiabilidad según los métodos referidos. Los valores promedio considerados en los análisis para el peso unitario del suelo, coeficiente de fricción suelo-concreto, ángulo de fricción interna del suelo y peso unitario del concreto fueron 18.8 KN/m³, 0.5, 30° y 23.5 KN/m³, respectivamente. En el método FOSM, calcularon los FS promedio que generaba cada parámetro al incrementar en un 10% sus medias, mientras los otros parámetros mantenían sus valores iniciales, con el objeto de medir la contribución de cada variable sobre el cálculo del FS. Además, en MEF se estableció una relación entre el FS, factor de fricción suelo-concreto y ángulo de fricción interna. El estudio resaltó la importancia del enfoque probabilístico.

En este punto, es notable el avance logrado en la evaluación de la estabilidad de taludes, y más aún con los nuevos enfoques propuestos que permiten representar mejor la realidad y obtener resultados más coherentes, que expliquen con mayor detalle la respuesta de los taludes. Del mismo modo, la disponibilidad de herramientas computaciones, metodologías de estudio y técnicas de estabilización, facilitan el tratamiento de la incertidumbre inherente en estos casos, permiten la gestión en la identificación de peligros y mitigación de riesgos, y contribuyen a proveernos de un portafolio más amplio de alternativas de solución que permitan satisfacer las demandas de cada proyecto en particular. La predicción del comportamiento de taludes de suelo está sujeta a muchas variables y limitaciones que cada caso impone.

RFN

El objeto común de todos los análisis es el de garantizar la seguridad del talud mediante la ejecución de alguno de los métodos de estabilización, o la construcción de estructuras de contención y mecanismos similares. Para ello, es necesario el desarrollo de modelos geotécnicos que representen, en buena medida, las características del talud real en cuestión y contemple los escenarios menos favorables en la evaluación de este. En la actualidad se recurre, entre otras técnicas, a los métodos de análisis probabilístico, entre los que resaltan, como los más empleados, el método primer orden segundo momento (FOSM), las estimaciones puntuales o las simulaciones de Montecarlo e hipercubo latino.

Existe suficiente evidencia, con base en investigaciones rigurosas y experiencia acumulada, que sugiere la adopción de factores de seguridad de taludes en un rango entre 1.5 y 3.0, con el objeto de asegurar la estabilidad de estos a largo plazo (Babu, *et al.*, 2014; Phoon & Ching, 2014). Además, los análisis de estabilidad con enfoques probabilísticos permiten cuantificar la incertidumbre de los parámetros que intervienen en el comportamiento de estas estructuras, y por tanto, se recomienda que los diseños se sostengan sobre los resultados de factores de seguridad en conjunto con aquellos que resultan de los análisis de confiabilidad, como medida complementaria en función de la seguridad.

En suma, es posible inferir que las evaluaciones de estabilidad de taludes aplicadas desde enfoques de análisis tradicionales deterministas, en los cuales se emplean valores fijos, mínimos o promedio, de las propiedades del suelo y condiciones externas, no pueden modelar adecuadamente la realidad, ni garantizar la eficacia y conveniencia en la elección de las soluciones al fenómeno de inestabilidad, que se desprenden de la interpretación sesgada de los resultados de tales estudios. En razón de ello, es elemental la inclusión del enfoque de análisis probabilístico en esta área en la que domina la incertidumbre, al permitir abordar la inestabilidad bajo la consideración de asumir que en el plano real existe un sinfín de combinaciones de parámetros que describen la variabilidad del medio físico de análisis.

Todos estos estudios se limitan a la mecánica de suelos y rocas, para explicar las propiedades y comportamiento de los mismos frente a solicitaciones de esfuerzos y condiciones especiales, y a la estadística, para la organización, análisis e interpretación de los datos característicos del talud de suelo y entorno, tal como se expone en la siguiente sección.

REN

2.2 Bases teóricas

En esta sección se presenta lo concerniente a la teoría y consideraciones relacionadas a la mecánica de suelos, el estudio de la estabilidad de taludes, los aspectos esenciales sobre la confiabilidad geotécnica y algunas consideraciones generales en el uso del software Slide. Todo ello, sobre lo cual se apoyan el estudio del suelo y el análisis de estabilidad de taludes, permitirá la comprensión del comportamiento de un talud frente a solicitaciones de esfuerzos, mecanismos de falla, condiciones que influyen en la determinación del FS y probabilidad de falla asociada a este, así como también lo referente al plano estadístico, sobre los métodos de análisis, la caracterización geotécnica y la posterior interpretación de resultados.

2.2.1 Mecánica de suelos

El suelo ha sido desde siempre un elemento indispensable en el desarrollo de varios aspectos en la vida del hombre, porque le ha provisto de una serie de ventajas que le han permitido mejorar su entorno a través de las actividades que en este se pueden realizar. El uso del mismo, de manera directa e indirecta, como recurso, ha satisfecho muchas necesidades básicas, desde la alimentación, mediante la ejecución de aquellas acciones que demanda la labor agrícola, hasta la urgencia de un refugio, a través de la construcción de viviendas, además de vías de tránsito, puentes o estructuras de control de fuentes de agua para múltiples propósitos. En ingeniería civil, el estudio del suelo es imprescindible en todos los proyectos, ya sea como material de construcción o como elemento portante de estructuras. En razón de ello, es importante el reconocimiento de los aspectos fundamentales que lo describan.

El estudio de su formación y composición, hasta su clasificación, estados y propiedades, es necesario para comprender su comportamiento frente a solicitaciones de cargas, esfuerzos, deformaciones y condiciones especiales a las que se encuentre sometido, con el objeto de evaluar sus cualidades de la forma adecuada. Una de las áreas de la ingeniería civil más estrechamente relacionada al estudio de este medio físico es la mecánica de suelos. De acuerdo a Karl Terzaghi (1925), considerado el padre de este campo, la define como la ciencia aplicada, de las leyes de la mecánica e hidráulica, a los problemas geotécnicos sobre depósitos sedimentarios y acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas generadas por procesos de desintegración física o descomposición química de los estratos rocosos

Los materiales de que está constituida la corteza terrestre encuentran diversas clasificaciones según el área de estudio que los evalúa. En ingeniería, la clasificación arbitraria de uso común divide a dichos materiales en dos grandes categorías: suelos y rocas. El primer grupo hace referencia al agregado natural compuesto de granos minerales que es posible separar mediante medios mecánicos relativamente suaves, como la simple agitación de las partículas en el agua; el segundo, a partículas minerales conectadas entre sí por fuerzas cohesivas fuertes y permanentes (Terzaghi, *et al.*, 1996). Para fines de esta investigación el término *suelo* se aplicará exclusivamente a los materiales que obedezcan la primera definición, ello incluye a los estratos compuestos por rocas fragmentadas cuyo comportamiento mecánico y propiedades se asemejen al de los suelos.

2.2.2 Génesis del suelo

La alteración que experimenta la roca madre genera la mayor parte de los suelos que cubren la superficie del planeta. Esta alteración se debe a una serie de factores naturales a los que está expuesta la roca, y dan lugar a procesos erosivos y de meteorización, que la desintegran o descomponen. Estos procesos se traducen en acciones mecánicas y reacciones químicas o biológicas, capaces de deformar los macizos rocosos de las capas profundas de la corteza y generar distintos tipos de suelos con propiedades y características particulares que los diferencian entre sí. Según Duchaufour (1960), son 3 los procesos que ocurren en la evolución de los suelos, sean estos la alteración de las rocas, el aumento del contenido de materia orgánica y la movilización de elementos solubles.

Entre los componentes que intervienen en la formación de los distintos tipos de suelos se encuentra la naturaleza y composición de los estratos rocosos, variación en las condiciones meteorológicas, condiciones topográficas, condiciones sísmicas, condiciones de acarreo, duración de diversos escenarios de ocurrencia de fenómenos y condiciones extraordinarias, u ocurrencia de fenómenos naturales. Las distintas propiedades que poseen los suelos dependen del origen de las rocas que constituyen la corteza terrestre. Estas se dividen en 3 grupos: rocas ígneas, rocas metamórficas y rocas sedimentarias. La alteración que sufran dichas rocas, debido a la erosión y meteorización, determinará variados rangos de tamaños, formas y composición de los granos de que estará compuesto cada tipo de suelo.

2.2.2.1 Clasificación del suelo. Desde que las propiedades y características de los suelos cobraron interés a nivel mundial, debido a las distintas actividades en las que se le podía emplear, los intentos por clasificarlos han sido recurrentes y en su mayoría vanos. Esto se debió a que los sistemas de clasificación se basaban en un único criterio, dejando de lado los efectos que tenían el resto de características de las que se prescindían para tales fines (granulometría, forma, uso, composición, origen, entre otros), lo que generaba considerables errores al momento de describir los suelos. Sin embargo, gracias a la revisión crítica de dicho problema, y la propuesta de un sistema unificado, desarrollado en 1929, fue posible establecer un mecanismo de categorización comprensible (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 4ta ed., 2015).

En la actualidad existen dos sistemas de clasificación comúnmente empleados a nivel internacional; estos dividen a los suelos en grupos y subgrupos con propiedades y características similares, bajo criterios de diferenciación basados en la distribución granulométrica y la plasticidad (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 4ta ed., 2015). El primero, el *Sistema Unificado de Clasificación de Suelos* (SUCS), utilizado generalmente por ingenieros geotécnicos para múltiples tipos de obras, y el segundo, el de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), utilizado principalmente por los departamentos de carreteras y obras similares (Terzaghi, *et al.*, 1996; Das, 2015). Estos importantes sistemas se han utilizado ampliamente en las últimas décadas, los cuales se describen a continuación.

2.2.2.1.1 *SUCS.* Este sistema simple de clasificación fue propuesto por Casagrande en 1948, y es ampliamente usado en geotecnia. Su designación en la American Society for Testing and Materials (ASTM) es D-2487. Se emplea principalmente en edificaciones. El método se basa en dos parámetros específicos: granulometría y plasticidad.

Según estos parámetros, diferencia dos categorías de suelo: los de grano fino y los de grano grueso, que a su vez se subdividen en gravas, arenas, limos y arcillas. Incluso toma en cuenta en la clasificación los suelos con probable contenido de materia orgánica. La nomenclatura que este sistema emplea para referirse a cada subgrupo de suelo se basa en prefijos en inglés, los cuales hacen mención de la granulometría, plasticidad y gradación.

El procedimiento de clasificación inicia con la determinación del porcentaje en peso de la muestra de suelo que pasa el tamiz n° 200, y que separa las partículas gruesas de las finas. Se considera que el suelo es de tipo grueso, si más del 50% de la muestra tamizada queda retenida en el tamiz n° 200, y fino, si ocurre lo contrario. La fase gruesa del suelo, grava o arena, se denomina con los prefijos G (gravel) o S (sand), y la fase fina, limo, arcilla, limos y arcillas orgánicos y turbas, se denomina con los prefijos M (mo), C (clay), O (organic) o Pt (peat), respectivamente. En el caso de suelos considerados gruesos, si más del 50% de la fracción gruesa tamizada pasa la malla #4, se clasifica como arena (S), sino como grava (G).

Existen cuatro subgrupos en los que queda definida la clasificación del suelo, agregando un símbolo que indica una buena o mala gradación, W (well graded) o P (poor graded), o un contenido significativo de finos plásticos o no plásticos, M (mo) o C (Clay). Cuando exista un tipo de suelo de dudosa clasificación, se debe elegir el subgrupo con menor plasticidad, y en los casos de frontera, emplear símbolos dobles. En el caso de suelos considerados finos, se siguen criterios de clasificación similares a los seguidos para los suelos gruesos, y se diferencian según el limite líquido (LL) que posean, asignando el prefijo H (high) para indicar un LL > 50%, y el prefijo L (low) para indicar un LL < 50%.

2.2.2.1.2 AASHTO. Este sistema de clasificación fue desarrollado en 1929, y es empleado principalmente en la ingeniería de caminos, diferenciando la calidad del suelo de base o subbase para carreteras, en grupos desde la denominación A-1 hasta la A-7. Dicho sistema fue publicado como el Road Administration Clasification System, y su designación en la ASTM es D-3282. Los parámetros que emplea son los mismos que en el sistema SUCS, pero además considera un tercer parámetro denominado Índice de grupo (IG), en el que relaciona un porcentaje de tamaño de partícula, el índice de plasticidad y el límite líquido, en una fórmula empírica que permite clasificar la calidad del suelo como material subrasante. Es importante señalar que el valor del IG y la calidad del suelo son inversamente proporcionales.

La clasificación en el sistema AASHTO es similar al sistema SUCS, donde es necesario realizar el análisis granulométrico, el cálculo de los límites de Atterberg y la determinación del parámetro IG. Se considera suelo con material granular si el 35% del total de la muestra, o menos, pasa el tamiz n° 200, de lo contrario se considerará como suelo con contenido de material fino. El grupo de suelos granulares se subdivide en 3 clases, A-1, A-2 y A-3, cuya nomenclatura indica gravas y arenas, gravas y arenas limosas o arcillosas, y arenas finas, respectivamente. El grupo de suelos finos se subdivide en 4 clases, A-4 y A-5, que indican un suelo limoso, y las clases A-6 y A-7, que indican un suelo arcilloso.

En ambos grupos de clasificación, los parámetros requeridos para poder diferenciar los suelos son el porcentaje de material que pasa los tamices n° 10, n° 40 y n° 200, y las características de plasticidad, LL e IP, de la fracción que pasa el tamiz n° 40. La clasificación del suelo indicará la calidad de este como material de subrasante. Las clases A-1, A-2 y A-3 se consideran de calidad buena a excelente, y las restantes, de calidad mediana a pobre. Asísmismo, el IG se calcula mediante la ecuación (1), donde F representa el porcentaje de agregado que pasa el tamiz nº 200, LL indica el límite líquido e IP refleja el índice de plasticidad (Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 4ta ed., 2015). Si el valor de IG resulta negativo se considerará cero (0).

$$IG = (F - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$
(1)

Los dos sistemas antes descritos presentan distintos modos de clasificación, criterios y nomenclatura. Sin embargo, es posible resaltar las coincidencias entre grupos de suelos con propiedades y características similares, identificados con ambos sistemas. En la Tabla 2 se muestra el comparativo de los tipos de suelo clasificados desde ambos métodos, a modo de relacionar los variados grupos de suelos.

	Comparación con grupos de suelo del sistema SUCS			
Sistema AASHIO	Más probable	Posible	Posible, pero improbable	
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM	
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	-	
A-3	SP	-	SW, GP	
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP	
A-2-5	GM, SM	-	GW, GP, SW, SP	
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP	
A-2-7	GM, GC, SM, SC	-	GW, GP, SW, SP	
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC	
A-5	OH, MH, ML, OL	-	SM, GM	
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM	
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC	
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM	

Tabla 2

Comparación entre sistemas AASHTO y SUCS

A partir de los sistemas de clasificación mencionados anteriormente se pueden esbozar algunas ideas generales del probable comportamiento de los distintos tipos de suelos frente a diversas solicitaciones de esfuerzos. Asímismo, el uso de tablas, fórmulas y ábacos permiten la determinación numérica de dicho comportamiento resistente. Sumado a ello, se puede recurrir a correlaciones a partir de algunos parámetros del suelo, en razón de que los resultados de ensayos del suelo se ajusten a las ecuaciones que se propongan para la estimación de las propiedades de interés en zonas específicas, que resulten satisfactorias en tales áreas locales de estudio. Cuanto más grande sea el registro de puntos estudiados en un área específica, mejor definidas quedarán las ecuaciones de correlación que se planteen. En este punto, resulta importante señalar la transcendencia en la clasificación de los suelos sobre la base de la resistencia de estos a los esfuerzos cortantes.

Bajo las consideraciones antes expuestas, la clasificación del suelo también responde a criterios de resistencia a esfuerzos, a partir de los cuales se diferencian tres grandes grupos: suelos cohesivos y no cohesivos, suelos normalmente consolidados y preconsolidados, y suelos finos y con partículas gruesas (IGME, 1987).

El primer grupo diferencia a los suelos según la existencia de fuerzas internas de cohesión que mantienen unidas a las partículas que lo conforman, debido a la presencia de agua ocupando parcialmente los poros entre los granos; por lo general, se les considera a los suelos finos, arcillosos o limosos, como suelos cohesivos, y los suelos gruesos, gravas y arenas, como suelos no cohesivos. En estos últimos se considera cohesión nula.

El segundo grupo diferencia a los suelos según las presiones verticales in situ que posee el terreno, a lo largo de su historial geológico, en una determinada área de estudio. En ese sentido, los suelos que poseen máximas presiones se les cataloga como suelos normalmente consolidados, mientras que los que poseen presiones menores a las máximas, como suelos preconsolidados o sobreconsolidados.

El tercer grupo diferencia a los suelos según el tamaño de sus partículas, tal como se muestra en la Tabla 3. Al igual que los grupos anteriores, este criterio de diferenciación también influye en el comportamiento de los suelos bajo solicitaciones de esfuerzos. En este grupo se pueden diferenciar a las gravas, arenas, limos y arcillas, en orden descendente al tamaño de las partículas. Entre estos subgrupos es evidente que existen suelos intermedios.

Tabla 3

Clasificación del suelo según tamaño de partículas

Definición	Tamaño de partículas	Identificación en campo
Gravas	> 2 mm	Medible
Arenas	> 0.06 mm y < 2 mm	Visible
Limos	> 0.002 mm y < 0.06 mm	Áspero al tacto
Arcillas	< 0.002 mm	Suave al tacto y se adhiere a él

Nota. IGME (1987)

2.2.2.2 Relaciones gravimétricas y volumétricas. La revisión general de los procesos geológicos, descripción de propiedades, características y sistemas actuales de clasificación de suelos, ofrecen una base sobre la cual es posible entender la estructura y comportamiento del suelo en su estado natural. En esa misma línea, resulta conveniente idealizarlo como un sistema trifásico, compuesto por las fases sólida, líquida y gaseosa, para establecer un conjunto de relaciones gravimétricas y volumétricas que contribuyan a su caracterización. En la Figura 3 se muestra de forma referencial el suelo en sus estados natural e idealizado.

Figura 3

Suelo natural (a) y suelo idealizado (b)



Nota. Adaptado de Das (2010)

Con el modelo trifásico del suelo idealizado se puede diferenciar cada una de las fases de que está compuesto y definir algunas de las principales relaciones gravimétricas y volumétricas, dependientes de los parámetros peso y volumen. Para dicho modelo el volumen y peso total son la suma de los volúmenes y pesos correspondientes a cada una de las fases, tal como se aprecia en las ecuaciones (2) y (3). Asimismo, se asume que, para efectos prácticos, el peso de la fase gaseosa se considera despreciable. Los subíndices de los parámetros volumen y peso indican los elementos sólidos (s), vacíos (v), agua (w) y aire (a).

$$V_m = V_s + V_v = V_s + V_w + V_a$$
(2)

$$W_m = W_s + W_w \tag{3}$$

De las consideraciones antes mencionadas, y los arreglos de volumen y peso total establecidos en la anterior sección, se desprenden las relaciones expuestas a continuación:

Pesos específicos:

- γ_0 : peso específico del agua destilada a 4 °C, bajo 1 atm de presión
- γ_m : peso específico de la masa del suelo (fases sólida y líquida)
- γ_s : peso específico de la fase sólida del suelo
- γ_{w} : peso específico de la fase líquida en condiciones naturales

$$\gamma_{m} = \frac{W_{m}}{V_{m}} = \frac{W_{s} + W_{w}}{V_{s} + V_{w} + V_{a}}$$

$$\gamma_{s} = \frac{W_{s}}{V_{s}}$$

$$\gamma_{w} = \frac{W_{w}}{V_{w}}$$

$$(4)$$

$$(5)$$

$$(6)$$

Pesos específicos relativos:

- S: relación entre peso específico de una sustancia y el peso específico del agua (γ_0)
- S_m: peso específico relativo de la masa del suelo
- S_s: peso específico de la fase sólida del suelo
- S_w: peso específico de la fase líquida del suelo

$$S_m = \frac{\gamma_m}{\gamma_0} = \frac{W_m}{\gamma_0 \cdot V_m} \tag{7}$$

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} = \frac{W_s}{\gamma_0 \cdot V_s} \tag{8}$$

$$S_w = \frac{\gamma_w}{\gamma_0} = \frac{W_w}{\gamma_0 \cdot V_w} \tag{9}$$

Contenido de agua gravimétrico o humedad del suelo:

 w: parámetro que relaciona la variación gravimétrica del agua respecto al peso de la fase sólida del suelo en un volumen dado; los valores expresados en porcentajes varían en un rango de 0% a infinito.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \tag{10}$$

Contenido de agua volumétrico o humedad relativa:

 θ : relación de la variación volumétrica del agua respecto al volumen de la masa de suelo; los valores porcentuales varían entre 0% y valores cercanos a 100%.

$$\theta = \frac{V_w}{V_m} = \frac{V_w}{V_s + V_w + \frac{V_w}{V_w + V_w + V_w + \frac{V_w}{V_s + V_w + V_w + \frac{V_w}{V_w + V_w + V_w + V_w + \frac{V_w}{V_w + V_w +$$

(11)

Grado de saturación:

 G_w : parámetro que relaciona el volumen de vacíos llenos de agua respecto al volumen total de vacíos; los valores expresados en porcentaje varían en un rango entre 0% y 100%.

$$G_w = \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_w + V_a} \tag{12}$$

Proporción de vacíos:

e: parámetro que relaciona los volúmenes de vacíos y la fase sólida del suelo.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_w + V_a}{V_s} \tag{13}$$

Porosidad:

n: relación de los volúmenes de vacíos y total; los valores varían entre 0% y 100%.

$$n = \frac{V_{\nu}}{V_m} = \frac{V_w + V_a}{V_s + V_w + V_a}$$
(14)

Relación de vacíos en función de la porosidad:

Tal relación deriva de la combinación de las ecuaciones (2), (13) y (14).

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V_m - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_m}}{1 - \frac{V_v}{V_m}} = \frac{n}{1 - n}$$
(15)

Porosidad en función de la relación de vacíos:

Tal relación deriva de la ecuación (15).

$$n = \frac{e}{1+e} \tag{16}$$

Pesos específicos en función del contenido de agua gravimétrico:

Tal relación deriva de las ecuaciones (3), (4) y (10). Cuando el contenido de humedad es nulo se obtiene el peso específico del suelo en estado seco, a partir del cual es posible establecer una relación entre los pesos específicos en condición natural y seca, con la humedad, según la ecuación (18).

$$\gamma_{m} = \frac{W_{m}}{V_{m}} = \frac{W_{s} + W_{w}}{V_{m}} = \frac{W_{s} \cdot (1 + \frac{W_{w}}{W_{s}})}{V_{m}} = \frac{W_{s} \cdot (1 + w)}{V_{m}}$$

$$\gamma_{d} = \frac{W_{s}}{V_{m}} = \frac{\gamma_{m}}{(1 + w)}$$
(17)
(18)

Así como las ecuaciones antes presentadas, que en esencia constituyen las principales relaciones a tomar en cuenta en la caracterización de los suelos, existen muchas otras que derivan de aquellas aquí expuestas. Todas estas ecuaciones nacen del modelo trifásico, por representar las tres fases en las que se puede dividir la masa de suelo en la mayoría de los escenarios reales. Del mismo modo, existen otros modelos que solo consideran dos fases, a partir de los cuales se desprenden otras relaciones similares, como el sistema bifásico de suelo saturado, que solo contempla las fases sólida y líquida.

2.2.3 Estabilidad de taludes

Un talud o ladera es una masa de tierra que presenta una topografía irregular, con cambios significativos en su geometría, específicamente relacionados a pendientes y alturas. En la literatura técnica la definición de "ladera" responde a la conformación de un proceso natural, mientras que "talud", al resultado de un proceso artificial, como se ve en la Figura 4. Los taludes y laderas pueden agruparse en tres categorías generales: terraplenes, cortes de laderas naturales y muros de contención, o a las combinaciones de estos (Suárez, 2009).

Los problemas referentes a la estabilidad de taludes y laderas, denominados en general deslizamientos, han sido objeto de análisis en diversas áreas de la actividad humana, especialmente en el campo de la ingeniería, y suponen en esencia la falla de una porción de suelo, que se desplaza en la dirección de la gravedad y hacia el exterior de la masa total de la que formaba parte, cuya ocurrencia se presenta de todas las formas posibles, a velocidades variadas, con provocación aparente o sin ella (Terzaghi, et al., 1996; IGME, 1987).

El análisis de la estabilidad de taludes, o laderas, supone una serie de consideraciones a estudiar debido a la variedad de condiciones que pueden generar deslizamientos de suelo. Para la presente investigación, según los objetivos planteados, nos enfocaremos solo en el desarrollo de tres aspectos importantes, sean estos los concernientes al esfuerzo cortante en suelos, principales mecanismos de falla de taludes y los métodos de análisis de estabilidad.

Figura 4

Nomenclatura de taludes y laderas



Nota. Adaptado de Suárez (2009)

2.2.3.1 Esfuerzo cortante. En geotecnia, la resistencia al cortante de suelos es uno de los conceptos más importantes que se tratan, tanto en la resolución de problemas, como la determinación de presiones, capacidad portante o inestabilidad, así como el diseño de estructuras de contención y sistemas de estabilización (Das, 2010; Pérez, 2018; Suárez, 2009).
En esa línea, es posible el estudio de dichos esfuerzos mediante la teoría de ruptura del suelo presentada por Mohr (1900), la cual sostiene que el suelo puede fallar debido a una combinación de esfuerzos normales y cortantes críticos, y no solo a esfuerzos máximos.

La envolvente de falla de dicha relación está definida por una función que describe una línea curva. Sin embargo, en la práctica normal de ingeniería se emplea una función lineal aproximada, dentro de un rango de esfuerzos, según lo planteado por Coulomb (1776) y modificado por Terzaghi (1925), como se aprecia en las ecuaciones (19) y (20).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \tag{19}$$

(20)

$$\tau = c' + (\sigma - \mu_w) \tan \varphi$$

donde:

τ : esfuerzo cortante(σ-μ_w) : esfuerzo efectivo neto

c, c' : cohesión y cohesión efectiva

 φ, φ' : ángulo de fricción y ángulo efectivo de ficción

A partir de lo antes expuesto, varios autores han ido incorporando a estas formulaciones nuevas variables que han permitido mejorar la modelación de la realidad, con análisis más rigurosos de condiciones particulares del suelo, reflejados en diseños cada vez más satisfactorios frente a distintas solicitaciones. Entre los modelos propuestos, se encuentran los que permiten determinar la resistencia al corte en suelos saturados y no saturados, considerando la succión mátrica, curvas características, efecto histérico, entre otros.

2.2.3.2 Mecanismos de falla. La ocurrencia de fallas en taludes o laderas de suelo o roca responde a un proceso de variada duración en que convergen una serie de factores que comprende las condiciones iniciales del talud, lo que determina su susceptibilidad; el equilibrio de fuerzas actuantes y resistentes, representadas por un factor de seguridad; el deterioro progresivo de las condiciones iniciales del talud, y los factores desencadenantes que generan la activación del movimiento hasta la ruptura de una porción del suelo (Suárez, 2009).

Así mismo, las características del tipo de movimiento de la masa del suelo conservan una estrecha relación con la clase del material que constituye el talud y la disposición de este, lo que genera diferentes superficies de rotura. Los movimientos de masas se pueden clasificar de manera general en cuatro grandes grupos: desprendimientos, deslizamientos, extensiones y movimientos complejos. En la realidad, se presentan una variedad de movimientos, lo que supone una diversidad de factores que los originan (IGME, 1987). Debido a que existen múltiples escenarios de falla y superficies de rotura, el presente estudio se aboca específicamente al estudio de taludes sintéticos compuestos por suelo homogéneo, para superficies de falla circulares. Sin embargo, es posible emplear el mismo procedimiento de análisis para otros escenarios, tomando en cuenta las consideraciones que requiera cada caso particular. En la Figura 5 se puede visualizar a modo de resumen el esquema geomorfológico y tipos de movimientos de masas de suelo asociados, ya sean estos desprendimientos, deslizamientos, avalanchas, pandeos, vuelcos, coladas, entre otros.

Figura 5

Esquema geomorfológico y movimientos asociados



Nota. Adaptado de IGME (1987)

2.2.3.3 Métodos de análisis. La modelación matemática de taludes y laderas se realiza con el objeto de estudiar las condiciones de estabilidad de los mismos, además de evaluar la seguridad y funcionalidad de los diseños propuestos en el caso de taludes artificiales. Así mismo, existen diversas metodologías que permiten la modelación y análisis, dependiendo del objeto de los estudios. En esa línea, es posible identificar los principales objetivos que se pretenden al analizar y modelar taludes naturales o artificiales, sean estos la evaluación de las condiciones de estabilidad del talud, investigar potenciales mecanismos de falla, determinar niveles de susceptibilidad, comparar la efectividad de múltiples formas de estabilización y/o diseñar taludes óptimos en función de la seguridad, confiabilidad y economía (Suárez, 2009).

Las metodologías de análisis comprenden el enfoque determinístico y probabilístico. En este último caso, se incorpora el componente estadístico al común análisis determinístico. Los métodos determinísticos disponibles se pueden clasificar en tres categorías, sean los métodos de equilibrio límite, métodos numéricos y métodos dinámicos. Estos a su vez presentan tanto ventajas como limitaciones en el cálculo y análisis de estabilidad de taludes. Las principales discrepancias entre los métodos guardan relación con el criterio para evaluar, como el criterio de Mohr-Coulomb, para evaluar taludes de suelo, o el de Hoek-Brown, para los de roca (Pérez, 2018; Suárez, 2009). La elección del método a usar en el análisis de la estabilidad de taludes dependerá de las condiciones a evaluar y el grado de aproximación que se pretende alcanzar para cada caso.

De los métodos de análisis, los de equilibrio límite son los más utilizados debido a su simplicidad numérica, eficacia y economía, lo que supone un considerable conocimiento de sus límites y grados de confianza al estar ampliamente contrastados (Suárez, 2009).

En la Figura 6 se puede apreciar un esquema general de los métodos determinísticos más empleados en el análisis bidimensional de la estabilidad de taludes, y la Tabla 4 presenta un resumen de las características y consideraciones de los mismos.

Figura 6

Métodos de análisis de estabilidad de taludes



Nota. Adaptado de Suárez (2009)

Tabla	4
-------	---

Método	Superficie de falla	Equilibrio	Características
Bloques o cuñas	Cuñas con tramos rectos	Fuerzas	Análisis de fuerzas en cuña, sean simples, dobles o triples.
Talud infinito	Rectas	Fuerzas	Elemento fino, nivel freático, falla paralela a superficie.
Arco circular (Fellenius, 1922)	Circulares	Momentos	Análisis en suelo cohesivo, falla circular en bloque.
Ordinario / Fellenius (Fellenius, 1927)	Circulares	Fuerzas	Fuerzas nulas entre dovelas. Fácil aplicación, impreciso.
Espiral logarítmica (Frohlich, 1953)	Espiral logarítmica	Fuerzas y momentos	Falla espiral logarítmica, radio según ángulo de giro.
Bishop simplificado (Bishop, 1955)	Circulares	Momentos	Considera nulas las fuerzas de cortantes entre dovelas.
Janbú simplificado (Janbú, 1957)	Circulares	Fuerzas	Considera nulas fuerzas de cortantes entre dovelas.
Lowe y karafiath (1960)	Toda forma	Fuerzas	Asume inclinación de fuerzas según pendiente y dovelas.
Morgenster y Price (1965)	Toda forma	Fuerzas y momentos	Fuerzas entre dovelas varían según una función arbitraria.
Spencer (1967)	Toda forma	Fuerzas y momentos	Asume inclinación de fuerzas laterales en dovelas.
Sueco modificado. U.S. Army Corps of Engineers (1970)	Toda forma	Fuerzas	Fuerzas entre dovelas siguen la dirección de la pendiente.
Sarma (1973)	Toda forma	Fuerzas y momentos	Método de dovelas para calcular coeficiente sísmico.

Nota. Suárez (2009)

Es inevitable comparar las ventajas y limitaciones que presentan los distintos métodos de análisis de estabilidad de taludes, cuya aplicación de uno u otro obedece a determinados objetos de estudio, hipótesis previas y simplificaciones que permiten la solución de problemas. De algunos estudios se tiene que el método generalizado de equilibrio límite (GLE) y el método de Morgenster-Price son los procedimientos de evaluación de estabilidad de taludes más completos, basados en el principio del equilibrio límite (Fredlund, et. al, 1981); que no existen diferencias significativas al comparar los FS obtenidos de métodos numéricos y métodos de equilibrio límite (Abderrahmane & Abdelmadjid, 2016); que los FS de análisis bidimensionales suelen ser más conservadores que los de análisis tridimensionales, y que a pesar de que un análisis en 3D genera mayor información, requiere de consideraciones adicionales respecto a un análisis en 2D, es decir, mayor grado de incertidumbre (Rabie, 2014; Akbas y Huvaj, 2015).

Por lo anteriormente señalado, para la presente investigación es de interés enfocarse solo en dos de los métodos determinísticos a emplear en los análisis de estabilidad de taludes, sean estos Morgenster-Price (1965) y Spencer (1967), basados en el principio de equilibrio límite y en el análisis de la masa deslizante dividida en franjas verticales denominadas dovelas. En los procedimientos de análisis de dovelas se considera tanto el equilibrio de fuerzas, como el equilibrio de momentos de cada una de las dovelas respecto al centro del círculo que describe la superficie de falla crítica. Los métodos antes mencionados se consideran precisos, y son los más utilizados por los ingenieros geotécnicos por las cualidades que presentan. De todos modos, no existe un método de equilibrio límite que sea más significativamente preciso que otro, aunque es necesario indicar que el método de Spencer resulta más simple de aplicar en comparación al método de Morgenster-Price (Fredlund, et. al, 1981, Suárez, 2009; Das, 2015).

El uso extendido de estos dos métodos responde al nivel de precisión y a la versatilidad de su aplicación a cualquier forma de superficie de rotura. En la Figura 7 se aprecia (a) un esquema de la división de la masa y (b) las fuerzas que actúan.

Figura 7



División de masa deslizante y fuerzas actuantes en dovelas

Nota. Adaptado de Suárez (2009); Sackschewski (2017); Turpo (2018)

2.2.4 Confiabilidad geotécnica

La definición de confiabilidad comprende la probabilidad de que un sistema desempeñe de forma satisfactoria las funciones para las cuales fue diseñado, durante un determinado periodo y bajo condiciones específicas. En ese sentido, todo aquel evento que interrumpa dicha operación se denomina falla; en ingeniería y geotecnia, este concepto se entiende en términos de estados límites o servicio (Jaime y Montoya, 2008; Hidalgo y Pacheco, 2011; Pérez, 2018).

La importancia de este concepto radica en que los diseños basados en confiabilidad le otorgan al ingeniero la posibilidad de establecer un mejor juicio al momento de tomar decisiones, no solo apoyado en la experiencia o en un único valor de factor de seguridad de la estructura o diseño, sino en términos que relacionan probabilidad de falla, riesgo e incertidumbre asociados a tales FS (El-Ramly, 2001; Pérez, 2018; Hernández y Torres, 2020).

En los siguientes apartados se da cuenta de manera general de la teoría y conceptos relacionados a la confiabilidad aplicada en geotecnia y de los métodos de análisis, haciendo hincapie en el desarrollo de las partes a considerar en los análisis de la presente investigación.

2.2.4.1 Teoría de confiabilidad. La confiabilidad aplicada a la geotecnia incorpora al típico análisis determinista la consideración de la incertidumbre inherente en todo sistema de ingeniería. Esto supone un paso adelante respecto a ignorar las incertidumbres. La información adicional que provee este enfoque permite al profesional estar "probablemente en lo cierto", en lugar de arriesgarse a estar "exactamente equivocado" (Lacasse y Nadim, 1998).

Morgenstern (1995), propuso una clasificación práctica de la incertidumbre geotécnica, la cual subdividió en tres categorías: incertidumbre de parámetros, de los modelos y humana. La primera engloba los datos de entrada para los análisis; la segunda, las limitaciones en la teoría y modelos predictivos; y la tercera, todos los posibles errores y equivocaciones humanas.

Baecher y Christian (2003), clasificaron también la incertidumbre en tres categorías: incertidumbre natural, incertidumbre epistémica e incertidumbre en los modelos de decisión.

La primera hace referencia a la ocurrencia de procesos naturales y la variabilidad de los mismos a nivel espacial y/o temporal; este tipo de incertidumbre se aproxima mediante modelos matemáticos o físicos, que proporcionen una razonable representación del fenómeno. La segunda está relacionada al conocimiento de la realidad que se desea analizar, cuyo estudio está limitado a la información de que se dispone y al entendimiento de esta; este tipo de incertidumbre se subdivide en tres grupos: de caracterización, de modelos y de los parámetros. La tercera corresponde a todo lo relacionado a las incertidumbres operacionales, que comprenden la implementación de los diseños, costos y beneficios, y a las incertidumbres de decisión, que contempla aspectos sociales, de planeación y riesgos adicionales a largo plazo.

En ambos casos se entiende la necesidad de modelar las incertidumbres y analizarlas.

La modelación probabilística de las incertidumbres se realiza mediante la asignación de una función de densidad de probabilidad, con valores de distribución estimados a partir del análisis de la información disponible y la experiencia. Para los fines del presente trabajo, los análisis de confiabilidad en la estabilidad de taludes solo toman en cuenta la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, modelados a partir de valores típicos de coeficiente de variación obtenidos de la literatura, que relacionan la desviación estándar y la media de cada uno de ellos. Además, se les asigna una distribución normal. Esto permite representar, acorde a la realidad, la posible variabilidad de los parámetros geotécnicos para efectuar los análisis de confiabilidad. En un escenario real, los parámetros geoténicos también podrían ajustarse a una distribución log-normal, pero ello dependerá de la información disponible y la rigurosidad que se pretenda. En la Tabla 5 se pueden apreciar los rangos típicos del CV de los parámetros geotécnicos considerados en los análisis de confiabilidad del presente trabajo de investigación.

Tabla 5

Parámetro	Coeficiente de variación (%)	Fuente
Dess serves if as	3.00 - 7.00	(Ribeiro, 2008)
Peso específico	4.00 - 8.00	(USACE, 1999)
Cohesión	20.0 - 80.0	-
	3.70 - 9.30	(Ribeiro, 2008)
Angulo de incción efectivo	7.50 - 10.1	(USACE, 1999)

Valores típicos de coeficientes de variación

Así mismo, las estimaciones de confiabilidad requieren de funciones de desempeño o funciones de estado límite, para poder determinar la condición del diseño (Prada, et al., 2011). Estas funciones delimitan un dominio seguro de uno no seguro. En ingeniería, las funciones comúnmente empleadas son el factor de seguridad (FS) y el margen de seguridad (MS), definidas en las ecuaciones (21) y (22), respectivamente. En este trabajo el FS se considera como una función de desempeño, a partir de la cual se analiza la estabilidad de taludes, y mediante métodos probabilísticos se determina la confiabilidad de los diseños evaluados, en términos de probabilidades de falla e índices de confiabilidad asociados a factores de seguridad.

$$FS = \frac{Resistencia}{Carga} = \frac{R}{Q}$$
(21)

MS = Resistencia - carga = R - Q(22)

Las cargas R a las que está expuesto un sistema, y la resistencia Q que este ofrece, se deben entender en el sentido más amplio. Es decir, estos conceptos abarcan no solo fuerzas y tensiones, sino también filtraciones, asentamientos y cualquier otro fenómeno que sea de interés a considerar en los diseños y análisis a ejecutar (Baecher y Christian, 2003).

Así pues, los análisis de confiabilidad relacionan cargas y resistencias como parámetros inciertos, cuya interacción genera resultados inciertos. Es decir, los análisis contemplan la incertidumbre presente en el sistema, la cuantifica y la modela. Esto es el enfoque probabilista. En cambio, en los análisis y diseños deterministas, usualmente la incertidumbre se maneja mediante la adopción, de manera intuitiva, de FS mayores. Sin embargo, esta estimación no permite justificar dichos valores adoptados, porque las incertidumbres no están cuantificadas. Esta limitación supone un sesgo en las conclusiones que resulten del análisis bajo ese enfoque. La Figura 8 presenta de manera referencial la distribución de probabilidades de cargas y resistencias, mientras que la Figura 9 muestra la relación entre estas expresadas en un margen de seguridad, a partir del cual se relacionan probabilidades de falla, factores de seguridad e índices de confiabilidad, definidos posteriormente.

Figura 8





Nota. Adaptado de Baecher y Christian (2003)

Densidad de probabilidad para margen M = 0



Nota. Adaptado de Baecher y Christian (2003)

Dado que las variables Q y R son continuas y presentan una determinada distribución, es posible identificar y relacionar sus características a partir de descriptores estadísticos, sean estos valores promedio o valores esperados, varianzas, covarianzas, entre otros, considerando que no existe correlación entre las mismas. De las definiciones elementales de los estadísticos antes mencionados se deducen las expresiones de confiabilidad e índice de confiabilidad, tal como se presentan en las ecuaciones (23 y (24, respectivamente. Se considera que la falla ocurre cuando FS = 1 (Pérez, 2018; Phoon K. K, 2008; Baecher y Christian, 2003).

$$\alpha = 1 - P_{(r)} \tag{23}$$

$$\beta = \frac{E[FS] - 1}{\sigma[FS]}$$
(24)

donde:

α	: confiabilidad
$P_{(r)}$: probabilidad de falla
β	: índice de confiabilidad para ajuste normal
E[FS]	: valor esperado de factor de seguridad
σ[FS]	: desviación estándar del factor de seguridad

No existe un consenso sobre los límites de probabilidad de falla máxima a tolerar en una estructura para considerarla confiable. Existen varios factores de los que estos dependen. Sin embargo, la propuesta del USACE (1999) es el mayor referente al momento de definir el nivel de desempeño aceptable que se desea en un diseño. En la Tabla 6 se presentan los niveles de desempeño esperados, asociados a unos índices de confiabilidad y probabilidades de falla. De este modo, verificamos estabilidad y confiabilidad al determinar FS y nivel de desempeño.

Tabla 6

Nivel de desempeño esperado	Índice de confiabilidad (β)	Probabilidad de falla (Pr)
Alto	5.0	3.0x10 ⁻⁷
Bueno	4.0	3.0x10 ⁻⁵
Arriba del promedio	3.0	1.0x10 ⁻³
Debajo del promedio	2.5	6.0x10 ⁻³
Pobre	2.0	2.3x10 ⁻²
Insatisactorio	1.5	7.0x10 ⁻²
Peligroso	1.0	1.6x10 ⁻¹

Niveles de desempeño asociados a índices de confiabilidad

Nota. USACE (1997)

Entre las herramientas estadísticas más empleadas, aplicadas a la geotecnia, que permiten calcular probabilidades de falla e índices de confiabilidad, se encuentran los métodos probabilísticos de primer orden segundo momento (FOSM), simulación Monte Carlo, método de hipercubo latino (LHS), estimativas puntuales, entre otros (Pérez, 2018; Phoon K. K., 2008). Cada método presenta sus ventajas y desventajas, relacionadas principalmente al número de iteraciones requerido, cantidad de variables empleadas, tiempo invertido para los análisis, los costos de aplicación, la complejidad matemática, el nivel de aproximación deseado, entre otros. En la Tabla 7 se presenta el número de cálculos requeridos para cada método probabilístico.

Tabla 7

Método probabilístico	Número de cálculos requeridos
Estimaciones puntuales	2 ^N iteraciones
Hasoer-Lind simplificado	Iteraciones > series de Taylor y estimación puntual
Simulación Monte Carlo	Típico > 5000 iteraciones
Hipercubo latino (LHS)	Típico > 1000 iteraciones
Series de Taylor (FOSM)	2N + 1

Cálculos requeridos según método probabilístico

Nota. Phoon y Retief (2016)

En este trabajo se aplican los métodos probabilísticos de FOSM y LHS, para determinar la probabilidad de falla e índices de confiabilidad. Así mismo, el método FOSM permite medir el nivel de contribución de los parámetros geotécnicos sobre la varianza de la función, es decir, la influencia de los mismos sobre la estabilidad y confiabilidad de las estructuras analizadas.

2.2.4.2 Métodos de análisis. Los métodos probabilísticos de FOSM y LHS permiten determinar la confiabilidad y las probabilidades de falla de los diseños, y se caracterizan por ser metodologías de relativa simpleza matemática al momento de aplicarlas. Además, el método FOSM permite evaluar la sensibilidad de los parámetros geotécnicos para medir el nivel de influencia que tienen sobre el comportamiento de los diseños analizados (Hidalgo Montoya y Pacheco de Assis, 2011). Para efectos del presente trabajo, a continuación se presenta la teoría relacionada a estos dos métodos que se emplearán en el análisis de los taludes sintéticos y el caso real de referencia.

Método de primer orden segundo momento (FOSM):

Este método se basa en el truncamiento de la función de expansión de la serie de Taylor, que se reduce a sus términos lineales, cuyos datos de entrada y salida se expresan en valores esperados y desviaciones estándar para cada una de los parámetros considerados en los análisis. Esto permite calcular el valor esperado y varianza de la función de desempeño (Pérez, 2018; Hidalgo Montoya y Pacheco de Assis, 2011; Prada, et al., 2011; Baecher y Christian, 2003).

El método resulta exacto para la evaluación de funciones lineales, porque asume que la diferencia $(X_i - \bar{X}_i)$ genera valores pequeños, por lo que potencias mayores se pueden ignorar. Sin embargo, para funciones no lineales esto cambia. En ese caso, el método se consideraría aproximado, porque las potencias ya no serían cero y los errores aumentarían al elevarse el orden de las mismas (Jaime y Montoya, 2008; El-Ramly, et al., 2003).

Así se tiene que, las expresiones de la función de desempeño, valor esperado, varianza y covarianza, en el análisis de *n* variables, son las siguientes:

$$FS = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$$
(25)

 $E[FS] = f(\overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3, \dots, \overline{X}_n)$ (2.1)

(26)

$$V[FS] = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \cdot V(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n-1} \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial X_j}\right) \cdot COV(X_i, X_j)$$
(27)

$$COV(X_i, X_j) = E[(X_i - \overline{X}_i) - (X_j - \overline{X}_j)]$$
(28)

donde:

- n : número de variables aleatorias
- X_i : variables aleatorias
- \overline{X}_i : valor medio de variables aleatorias ($\overline{X}_i = E[X_i]$)
- FS : función de desempeño (factor de seguridad)
- E [FS] : valor esperado de la función de desempeño
- V [FS] : varianza de la función de desempeño
- *COV* : covarianza entre variables

Además, en la varianza de la función de desempeño es posible identificar dos términos. El primero representa la contribución de las varianzas de cada variable a la varianza total, mientras que el segundo hace referencia a la posible correlación entre pares de variables. Asumiendo que las variables son estadísticamente independientes, es decir, que no existe correlación alguna entre ellas, la expresión de la varianza quedaría reducida al primer término:

$$V[FS] = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial X_i}\right)^2 \cdot V(X_i)$$

Este método probabilístico es una optimización del método de simulación de Monte Carlo, este último ampliamente descrito por varios autores (Hernández y Torres, 2020; Pérez, 2018; Prada, et al., 2011; Baecher y Christian, 2003; Lacasse y Nadim, 1998), del cual difiere en la forma de muestreo de las variables a analizar, al incorporar el concepto de estratificación en el eje Y de la curva de probabilidad acumulada, en rangos de igual probabilidad, distribuyendo de ese modo los números pseudoaleatorios de manera proporcional a los elementos de cada muestra entre los estratos definidos; en la Figura 10 y Figura 11 se aprecia dicha diferencia entre los métodos. Esta particularidad convierte al LHS en un método más eficaz, frente a Monte Carlo, porque requiere un menor tiempo de simulación y un menor número de iteraciones (Travesedo, 2017; Martins, et al., 2012; Baecher y Christian, 2003).

(29)

(a) Muestreo de Monte Carlo



Nota. Adaptado de Palisade (2010)

Figura 11

(b) Muestreo estratificado de hipercubo latino



Nota. Adaptado de Palisade (2010)

Del mismo modo que el método de Monte Carlo, la base del muestreo para el análisis de confiabilidad inicia con la generación de valores aleatorios a partir de una función de distribución acumulada. Este procedimiento se repite tantas veces como sea necesario, hasta la convergencia del análisis, con la diferencia en la técnica del muestreo por hipercubo latino, lo que lo cataloga como un método eficaz para análisis de confiabilidad (Pérez Fajardo, 2018).

Así pues, se considera la variable dependiente en función de las distribuciones de probabilidad de las variables aleatorias de entrada evaluándola determinísticamente, expresada en la forma:

$$F = f(X_1, X_2, X_3, ..., X_n)$$
(30)

La estratificación en el muestreo permite forzar a un conjunto de valores, por muy pequeño que sea, a una mejor representación de la distribución de probabilidades de ingreso. Esta técnica de muestreo, donde el número de estratificaciones es igual al de iteraciones, evita que una muestra de un estrato sea procesada dos veces, es decir, que cada muestra perteneciente a un determinado estrato se vuelve irremplazable (Palisade, 2010).

El método de LHS se emplea con frecuencia en estudios relacionados a la evaluación de incertidumbres y la determinación de la sensibilidad de parámetros en modelos matemáticos, por lo que resulta importante su aplicación en el análisis del comportamiento de un modelo frente a la variabilidad de las variables de ingreso, debido a sus ventajas en el muestreo, inversión de tiempo y ahorro de recursos (Liu, Li, & Yang, 2015).

2.2.5 Software Slide v6.0

El software Slide v6.0 (Rocscience, 2013), es una herramienta de modelación y análisis geotécnico en 2D, con un variado ámbito de aplicación en minería y obras civiles, que permite la evaluación del factor de seguridad de superficies de fallas circulares y no circulares, para taludes conformados por suelo o roca, mediante el empleo de métodos de equilibrio límite de corte vertical. Los modelos de análisis abarcan problemas de estabilidad en terraplenes, taludes en excavaciones mineras o edificaciones, presas, obras de contención, entre otros, y bajo distintas condiciones de contorno, cargas, efectos de precipitación, nivel freático, materiales, métodos de cálculo, búsqueda de superficies críticas, y la inclusión de conceptos estadísticos.

La presente sección da cuenta de las etapas de caracterización geotécnica, modelación y análisis de la estabilidad de taludes, para lo cual se describen los datos de entrada de las condiciones de contorno, y el proceso de configuración del análisis de la estabilidad. Asimismo, esta secuencia de pasos se limita al desarrollo de los objetivos planteados en este trabajo, es decir, al análisis bidimensional de taludes sintéticos y la evaluación de un caso real. Los escenarios se analizan en las condiciones estática y pseudoestática, mediante los métodos determinísticos Spencer y Morgenstern-Price, y los probabilísticos, de LHS y FOSM, con la finalidad de evaluar la incertidumbre en la determinación de la estabilidad y confiabilidad de las estructuras, además de medir la sensibilidad entre las variables geotécnicas de los modelos.

2.2.5.1 Condiciones de contorno. En esta sección se describen las condiciones de contorno y variables a considerar en una modelación y análisis de taludes, referidas específicamente a la presente investigación:

Geotecnia

<u>Parámetros geométricos</u>: estos se deducen de los perfiles estratigráficos, como resultado del estudio de suelos. La geometría se puede importar desde AutoCAD, o se puede definir de forma manual, ya sea para análisis de escenarios reales o hipotéticos, como ocurre en este caso. Las dimensiones básicas corresponden a la altura de talud, inclinación y espesor de los estratos.

<u>Parámetros geotécnicos</u>: estos se obtienen de ensayos y análisis de laboratorio de las muestras de suelo, como resultado del estudio de suelos. También es posible obtenerlos a partir de información recopilada de la literatura. La presente investigación solo considera las variables geotécnicas del peso específico del suelo, ángulo de fricción interna y cohesión.

<u>Parámetros sísmicos</u>: estos datos se basan en los registros sísmicos de las zonas de estudio o pueden ser deducidos, o asumidos, a partir de información recopilada de la literatura y normas. El software recepciona estos valores en términos de coeficientes de carga sísmica en las direcciones horizontal y vertical. Este trabajo solo considera la carga sísmica horizontal.

Estadística



<u>Parámetros estadísticos</u>: se ingresan los descriptores estadísticos de desviación estándar y valor promedio del peso específico del suelo, ángulo de fricción y cohesión, y el tipo de distribución de probabilidades para cada uno, en este caso, una distribución normal. Estos datos se obtuvieron del caso de referencia y de rangos de coeficientes de variación de la literatura.

<u>Métodos de análisis</u>: se definen los métodos de equilibrio límite con los que se ejecutarán los cálculos por el método de dovelas, para la determinación de factores de seguridad; para esta investigación se trabajó con los métodos de Spencer y Morgenstern-Price, debido a sus ventajas ya antes explicadas en el desarrollo de este trabajo.

<u>Técnica de muestreo</u>: se define el método de muestreo aleatorio y el número de iteraciones para los análisis probabilísticos; para esta investigación se trabajó con el muestreo de hipercubo latino, debido a sus ventajas ya antes explicadas en el desarrollo de este trabajo, y para un total de n=10000 iteraciones por cada simulación.

2.2.5.2 Análisis de estabilidad. En esta sección se describe la configuración final del software para el inicio del cómputo de datos e interpretación de resultados del análisis de estabilidad de los modelos planteados, referidos específicamente a la presente investigación.

<u>Software</u>: selección del tipo de superficies de deslizamiento a analizar, el método de búsqueda de superficies y el modo de búsqueda de cuadrículas para determinar centros de los radios críticos que generan los arcos para las superficies críticas de deslizamiento.

<u>Cálculo (*compute*)</u>: inicio del cómputo de datos para el cálculo de los factores de seguridad, probabilidades de falla e índices de confiabilidad de los modelos.

<u>Interpretación (*interpret*)</u>: generación de informe de resultados y gráficos que describen el comportamiento de los taludes en términos de factores de seguridad, probabilidades de falla e índices de confiabilidad, y el análisis de sensibilidad entre los parámetros de entrada.

2.3 Bases normativas

En las últimas décadas, la seguridad en los diseños ha cobrado mayor relevancia. Las normativas internacionales han ido adaptando sus métodos tradicionales a nuevos enfoques probabilísticos, donde se contemplan nuevos parámetros. Por ejemplo, en Estados Unidos ha habido un cambio progresivo de sus métodos de diseño por esfuerzos admisibles (ASD), a métodos de diseño por factores de carga y resistencia (LRFD) o estados límite; y en la Unión Europa, se contempla en el diseño el método de coeficientes parciales (Valiente, et al., 2015).

En Perú, varias normas se adaptaron a la propuesta de LRFD, como las relacionadas al diseño estructural, acero, hormigón o a la evaluación de cargas de viento y sismo.

Sin embargo, en el análisis y diseño geotécnico, los procedimientos se reducen a cumplir los requerimientos mínimos que establecen las normativas, sin considerar los resultados adicionales que ofrecen los análisis probabilísticos. En la Tabla 8 se aprecia un resumen de FS, según algunas normas.

Tabla 8

Normativa	Talud tempora	l	Talud permanente	
Inormativa	Estático	Sísmico	Estático	Sísmico
AAHSTO LRFD	1.33 - 1.53	1.10	1.33 - 1.53	1.10
NAVFAC-DM7	1.30 - 1.25	1.20 - 1.15	1.50	1.20 - 1.15
FHWA-NHI-11-032	-	1.10	-	1.10
Norma CE.020 / E.050	-	-	1.50	1.25

Factores de seguridad mínimos según normativas

Nota. Valiente, et al. (2015)

En la presente investigación se consideraron como referencia algunas normativas nacionales e internacionales, estas últimas pertenecientes a Estados Unidos, sean las normas NAVFAC y FHWA, y la Unión Europea, sea el Eurocódigo, según lo expuesto en la Tabla 9.

Tabla 9

•	T.	. •	• •		•		
N	J.	ormativas	nacional	AC A	1111	ternacionalec	
Τ.	٩.	omanyas	nacional	$c_{s}c$	111	i unacionales	

Normas	Nombre
	CE.020: Estabilización de suelos y taludes (2012)
Nacionales	E.030: Diseño sismorresistente (2018)
	E.050: Suelos y cimentaciones (2016)
	NAVFAC-DM7: Diseño de fundaciones y estructuras de tierra (1986)
Internacionales	FHWA-NHI-11-032: Diseño geotécnico en transporte y fundaciones (2011)
	Eurocódigo 7: Proyecto geotécnico (2007)

2.4 Hipótesis

General:

La evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos proporciona información complementaria sobre el comportamiento de taludes, referida a que la estabilidad de estos no garantiza su confiabilidad, por lo que es conveniente la adopción de enfoques de análisis probabilísticos que permitan conducirnos hacia conclusiones definitivas.

Específicos:

- El diseño de taludes sintéticos, sobre la base de un caso de referencia, permite la evaluación de estos y determina un posible cambio en la interpretación de resultados.
- La evaluación de confiabilidad y probabilidad de falla de taludes sintéticos, mediante la aplicación de los métodos probabilísticos de Hipercubo Latino y Primer Orden Segundo Momento, ofrece una ventaja frente a métodos de evaluación determinísticos.

Capítulo 3

Marco metodológico

Después de revisar la bibliografía referente a la estabilidad de taludes y métodos de análisis, en esta sección se describe la metodología aplicada a la evaluación de la estabilidad de taludes sintéticos, adaptados de un caso de referencia (Bhattacharya et al., 2013). Asimismo, este estudio se complementa con la evaluación de un caso histórico, el denominado talud María Reiche, obtenido de Mendoza (2016), con la intención de enfatizar la importancia del enfoque probabilístico. La hipótesis de la presente investigación plantea que un talud considerado estable, no necesariamente resulta confiable, por lo que es conveniente analizar ese aspecto.

Los taludes idealizados para ejemplificar la metodología son una variación del talud de referencia, al cual se modifica su geometría, pero conserva todas sus propiedades geotécnicas. Los taludes sintéticos se someten a 10000 simulaciones con la finalidad de determinar factores de seguridad, probabilidades de falla e índices de confiabilidad con una distribución normal. La incertidumbre de los parámetros geotécnicos está representada mediante el estadístico denominado coeficiente de variación, que relaciona valores promedio y desviaciones estándar. Los softwares empleados en el análisis y cálculos matemáticos son Slide v6.0 y Excel 2016.

3.1 Modelos sintéticos

La evaluación de la estabilidad y confiabilidad de taludes permite una adecuada gestión del riesgo, pero ello supone considerar en los análisis las incertidumbres asociadas al sistema. En ese sentido, es inevitable adoptar el enfoque probabilístico para incorporar la incertidumbre. Para la presente investigación, se seleccionó de modo arbitrario un talud de referencia, con el objeto de ejemplificar la metodología de análisis y adaptarlo a los planteamientos propuestos. La geometría y propiedades geotécnicas del talud se obtuvieron de Bhattacharya, et al. (2013). En la Tabla 10 y la Figura 12 se presentan los parámetros geotécnicos del talud de referencia de la literatura, y un esquema de la geometría simple del mismo, respectivamente.

Tabla 10

Parámetro	Valor medio	COV (%)	Desviación estándar
Cohesión (c')	18.00 KN/m ²	20.00	3.60 KN/m ²
Peso específico (γ')	18.00 KN/m ³	5.00	0.90 KN/m ³
Ángulo de fricción (φ')	30°	10.00	3°
Coeficiente de presión (r _u)	0.2	10.00	0.02

Propiedades geotécnicas del talud de referencia

Nota. Bhattacharya, et al. (2013)

Geometría simple de talud de referencia



Nota. Adaptado de Bhattachayra, et al. (2013)

Con base en el talud de referencia, se adaptó la geometría y propiedades geotécnicas para el diseño de taludes sintéticos, además de incorporar el parámetro sísmico de coeficiente de aceleración horizontal, para evaluar la condición pseudoestática, y el parámetro estadístico de coeficiente de variación, para representar la incertidumbre de las propiedades geotécnicas. La metodología de análisis comprende tres etapas: investigación, caracterización y modelación.

3.1.1 Investigación

Esta etapa abarca la indagación bibliográfica y análisis concernientes al área de interés, de acuerdo al nivel de estudio del proyecto y la envergadura del mismo. La rigurosidad en la información dependerá de la etapa de estudio en que se encuentre el proyecto y la ingeniería aplicada en la obtención de la información. Con una mayor disponibilidad de información será posible reajustar y mejorar los diseños. Existen distintas denominaciones para diferenciar las etapas de un proyecto, desde su concepción hasta su ejecución. Se puede convenir agruparlas en tres: estudio conceptual, prefactibilidad y estudio final de factibilidad (Steffen, et al., 2008). Asimismo, para esta investigación, no es objeto de interés profundizar en cada uno de estos aspectos, sino estudiar directamente un enfoque de análisis de taludes que complemente el análisis tradicional, para una mayor comprensión del concepto probabilístico, aprovechando la información bibliográfica y softwares disponibles para modelar y analizar taludes sintéticos. En ese sentido, podemos señalar que la presente investigación se desarrolla a nivel conceptual.

3.1.2 Caracterización

Teniendo en cuenta el talud de referencia, con el objetivo de analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, se asignan valores mínimo y máximo de coeficientes de variación a cada uno de estos, para representar una mínima y máxima incertidumbre.

Asimismo, se varía la geometría del talud inicial para generar múltiples escenarios, los cuales serán analizados en las condiciones estática y pseudoestática, para determinar factores de seguridad, probabilidades de falla, índices de confiabilidad y sensibilidad entre las variables. En la Tabla 11, Tabla 12 y Tabla 13 se presentan los valores asumidos para evaluar cada caso.

Tabla 11

Parámetros geométricos de taludes sintéticos

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Altura	Н	m	10, 20, 30
Pendiente	v:h	-	0.5:1, 1:1, 2:1

Tabla 12

Propiedades geotécnicas de taludes sintéticos

Darámatra	Símbolo	COV (%)	Unidad	Valor
Faranieuo	SIIIUUUU	Mín	Máx	Ulliuau	medio
Cohesión	c'	20.00	33.33	KN/m ²	18.00
Peso específico	γ'	3.00	8.00	KN/m ³	18.00
Ángulo de fricción	φ'	3.70	10.10	-	30°

Nota. Se asume COV máximo de cohesión de 33.33%, para evitar valores negativos

Tabla 13

Parámetros sísmicos de taludes sintéticos

Darámatra	Símbolo	Condición	
Farametro	51110010	Estática	Pseudoestática
Coeficiente sísmico horizontal	K _h	0.00	0.24
Coeficiente sísmico vertical	K _v	0.00	0.00

Nota. Coeficiente conservador adoptado para condición crítica de sismo

3.1.3 Modelación

Caracterizados los taludes, la modelación abarca la definición de las condiciones de borde, la asignación de distribución de probabilidades de los parámetros geotécnicos, y las consideraciones referentes a la configuración del software. Es necesario señalar que aquello que no se especifique sobre la configuración no es de interés para este estudio, por lo que los análisis se ejecutan con la configuración por defecto del programa. En la Tabla 14 y la Figura 13 se muestran las condiciones de borde y su representación. Además, la Tabla 15 y Tabla 16 presentan la distribución de parámetros y configuración Slide.

Tabla 14

Condiciones de borde en taludes sintéticos

Descripción	Símbolo	Unidad	Valores
Longitud horizontal al pie del talud	2H	m	20, 40, 60
Longitud vertical al pie del talud	Н	m	10, 20, 30
Longitud horizontal en cresta de talud	2H	m	20, 40, 60

Figura 13

Esquema de las condiciones de borde para taludes sintético



Tabla 15

Configuración de software Slide para análisis de taludes sintéticos

Descripción	Valores / Nombres	Software
Métodos determinísticos	Mongenstern-Price, Spencer	Slide v6.0
Métodos probabilísticos	LHS / FOSM	Slide v6.0 / Excel 2016
Número de iteraciones	10000	Slide v6.0

Nota. El software Excel 2016 se empleó para el análisis por el método FOSM

Tabla 16

Distribución de probabilidades de parámetros geotécnicos	
--	--

Parámetro	Símbolo	Distribución
Cohesión	c'	Normal
Peso específico	γ'	Normal
Ángulo de fricción	φ'	Normal

Nota. El presente estudio asume que no existe correlación entre parámetros geotécnicos

En la siguiente sección se presenta la aplicación de la metodología para el análisis de un talud sintético y el análisis de un caso real, con el objeto de ilustrar el procedimiento seguido.

(PS°SX

3.2 Casos de estudio

En este apartado se presenta el procedimiento y resultados del análisis de estabilidad y confiabilidad de uno de los escenarios propuestos de taludes sintéticos, y, adicionalmente, se evalúa la estabilidad de un talud real, siguiendo la misma metodología aplicada a los modelos.

3.2.1 Talud sintético

Se presenta el procedimiento seguido para la caracterización, modelación y análisis de estabilidad de un talud sintético, adaptado a partir de la elección de un modelo de referencia. Se empleó el software Slide v6.0 para la modelación del talud, y el uso del software Excel para los cálculos referidos al método probabilístico de Primer Orden Segundo Momento (FOSM). Este primer escenario corresponde al talud sintético que presenta valores mínimos de altura y pendiente, analizado para la condición estática. Se determina su estabilidad y confiabilidad para las situaciones hipotéticas extremas de incertidumbre de los parámetros geométricos, representadas mediante un valor mínimo y uno máximo del estadístico coeficiente de variación.

• Caracterización: en la Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19 se presentan las condiciones iniciales y propiedades del modelo a evaluar mediante la modelación en el software.

Tabla 17

Parámetros geométricos de talud sintético - Caso 1

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Altura	Н	m	10
Pendiente	v:h	-	0.5:1 (26.55°)

Tabla 18

Parámetro	Símbolo	COV (⁶ Mín	‰) Máx	Unidad	Valor medio
Cohesión	c'	20.00	33.33	KN/m ²	18.00
Peso específico	γ'	3.00	8.00	KN/m ³	18.00
Ángulo de fricción	φ'	3.70	10.10	-	30°

Propiedades geotécnicas de talud sintético - Caso 1

Tabla 19

Parámetros sísmicos de talud sintético - Caso 1

Danématna	Símbolo	Condición
Parametro	51110010	Estática
Coeficiente sísmico horizontal	K _h	0.00
Coeficiente sísmico vertical	K _v	0.00

• Modelación: mediante el software Slide, se configura el proyecto de análisis, el cual abarca descripción, caracterización del modelo, distribuciones de probabilidades, condiciones de borde, selección de métodos a considerar, según lo desarrollado en la sección 3.1.3, a excepción del método FOSM, el cual se trabaja mediante Excel.

En las siguientes figuras se presenta el desarrollo de la configuración del software Slide.

Figura 14

Resumen del proyecto de análisis, caso 1

General Methods	Project Sum	imary	
Groundwater	Туре	Description	
- Statistics	Project Title	Caso 1 (H=10m, T=0.5:1)	
- Random Numbers	Analysis	Estático	
- Design Standard	Author	Tomás Garcés	
Project Summary	Company		
	Date Created		
	Comment 1		
	Comment 2		
	Comment 3		
	Comment 4		
	Comment 5		

Figura 15

Caracterización del talud para escenario de mínima incertidumbre, caso 1

1 □ Suelo homogéneo Cohesion ∧ Normal 18	2.2		Field Friday
	3.6	10.8	10.8
2 🛛 Suelo homogéneo Phi 🔨 Normal 30	1,11	3.33	3.33
3 🛛 Suelo homogéneo Unit Weight 🔨 Normal 18	0.54	1.67	1

Caracterización del talud para escenario de máxima incertidumbre, caso 1

1 □ Suelo homogéneo Cohesion ∧ Normal 18 6 18 18 2 □ Suelo homogéneo Phi ∧ Normal 30 3.03 9.09 9.09 3 □ Suelo homogéneo Unit Weight ∧ Normal 18 1.44 4.32 4.32	1 □ Suelo homogéneo Cohesion ∧ Normal 18 6 18 18 2 □ Suelo homogéneo Phi ∧ Normal 30 3.03 9.09 9.09 3 □ Suelo homogéneo Unit Weight ∧ Normal 18 1.44 4.32 4.32	ŧ	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
2 □ Suelo homogéneo Phi ∧ Normal 30 3.03 9.09 9.09 3 □ Suelo homogéneo Unit Weight ∧ Normal 18 1.44 4.32 4.32	2 □ Suelo homogéneo Phi ∧ Normal 30 3.03 9.09 9.09 3 □ Suelo homogéneo Unit Weight ∧ Normal 18 1.44 4.32 4.32	1	Suelo homogéneo	Cohesion	\wedge Normal	18	6	18	18
3 □ Suelo homogéneo Unit Weight ∧ Normal 18 1.44 4.32 4.32	3 🛛 Suelo homogéneo Unit Weight 🔨 Normal 18 1.44 4.32 4.32	2	🛛 Suelo homogéneo	Phi	∧ Normal	30	3.03	9.09	9.09
		3	Suelo homogéneo	Unit Weight	∧ Normal	18	1.44	4.32	4.32

Figura 17

Condiciones de sismo para talud sintético, caso 1

Seismic Load	? ×
Seismic load coefficient	ОК
Horizontal: positive in direction of failure	Cancel
Vertical: 🚺 positive down 🎽	
seismic force = (slice weight) x (seismic load coefficien	t) Statistics

Condiciones de borde y enmallado en talud sintético, caso l



Figura 19

Configuración de métodos numéricos en talud sintético, caso l

General Methods	Methods		_
Groundwater Transient	Methods	Convergence Options.	
- Statistics - Random Numbers	Bishop simplified	Number of slices:	25 💌
Design Standard Advanced	Corps of Engineers #2.	Tolerance:	0.005
- Project Summary	Janbu simplified	Maximum iterations:	50 🌲
	Lowe-Karafiath	Interslice force function	
	Ordinary/Fellenius Spencer	HalfSine	Change
1.00			
		_	_

Configuración de muestreo estadístico en talud sintético, caso l

	A for a set	_	_
General	Statistics		
- Methods		_	
Transient	Sensitivity Analysis		
Statistics	Probabilistic Analusia		
Random Numbers			
- Design Standard	Sampling Method: Latin-Hypercube		
Advanced			
Project Summary	Number of Samples: 10000		
	Australia Trans		
	Analysis Type		
	🖲 Global Minimum 🔷 🔿 Qyerall Slope		
	The second s		
Defaulte	OK	Con	lool

Resultados: una vez caracterizado y modelado el talud sintético, se procede a ejecutar el análisis numérico, mediante el software Slide v6.0, para las condiciones antes especificadas. El software reporta un informe de resultados sobre los valores de estabilidad y confiabilidad, en función de factores de seguridad, probabilidades de falla e índices de confiabilidad, además de gráficos que ayudan a identificar la relación existente entre los parámetros geotécnicos, la estabilidad y confiabilidad del talud, los métodos de análisis, entre otros aspectos, los cuales permiten trazar una interpretación. La Figura 21 muestra la representación de uno de los resultados del modelo estudiado. En la Tabla 20 se presentan los resultados de Slide. Los datos de muestreo que genera el software son empleados en Excel, para el análisis por el método FOSM, según el procedimiento descrito en la sección 2.2.4.2; los resultados se presentan en la Tabla 21.



Resultados por Spencer, escenario de mínima incertidumbre, caso 1

Tabla 20

Resultados de Slide, análisis de talud sintético en condición estática - Caso 1

Escenario	Método	FS_d	FSp	PF	RIn	RI_{Log-n}
	Spencer	2.364	2.365	0.000 %	7.351	10.941
Minima incertidumbre	Morgenstern-Price	2.363	2.365	0.000~%	7.361	10.956
Máxima incertidumbre	Spencer	2.364	2.375	0.000~%	3.942	5.848
	Morgenstern-Price	2.363	2.374	0.000~%	3.944	5.851

Nota. FSd y FSp son factores de seguridad determinístico y probabilístico, respectivamente; PF es probabilidad de falla; RIn y RIlog-n son índices de confiabilidad con distribución normal y log-normal, respectivamente

Parámetro X _i	v	V AV I	$\mathbf{EC}(\mathbf{V} + \mathbf{AV})$	Minima incertidumbre		Máxima incertidumbre		
	$\Delta \mathbf{A}_{i}$	$FS(X_i+\Delta X_i)$	V(Xi)	Contribución	V(Xi)	Contribución		
c'	18.00	1.800	2.449	12.62	84.60 %	35.05	67.29 %	
Φ '	30.00	3.000	2.551	1.199	13.84 %	8.938	29.52 %	
γ'	18.00	1.800	2.285	0.284	1.570 %	2.019	3.190 %	
	Índice	Índice de confiabilidad			7.387		3.953	
	Probabilidad de falla				0.000 %		0.008 %	

Resultados de	Excel, por	Morgenstern-	Price, método	b FOSM –	Caso 1

Nota: Xi es valor medio de parámetros; Δ Xi es el 10% de Xi; FS (Xi+ Δ Xi) es el factor de seguridad cuando solo un parámetro incrementa 10%; V(Xi) es la varianza de cada parámetro

3.2.2 Talud real

Tabla 21

Con la metodología aplicada al análisis de taludes sintéticos, se analizó la propuesta de corte para la estabilización del talud real María Reiche. Se emplearon los softwares Slide v6.0 y Excel 2016 para la modelación y cálculos numéricos. La geometría del talud histórico y propiedades geotécnicas se obtuvieron de Mendoza (2016). A partir de información disponible de la zona se incorporaron los datos necesarios para evaluar la condición sísmica del talud, así como los escenarios de incertidumbre antes mencionados. En la Figura 22 y Figura 23 se presentan la vista real del talud y la modelación de la propuesta de corte, respectivamente.

Figura 22

Vista real de talud María Reiche



Nota. Adaptado de El Comercio (2017)

Propuesta de talud María Reiche



Nota. Adaptado de Mendoza (2016)

En la Tabla 22 y Tabla 23 se presentan los parámetros empleados en los análisis. Cabe señalar que todos los valores considerados en el estudio de Mendoza (2016) se mantienen. Así mismo, los parámetros adicionales que se adoptaron para este caso de estudio corresponden únicamente al área estadística (coeficiente de variación), necesarios para ejecutar los análisis probabilísticos, según las consideraciones de la metodología aplicada en los taludes sintéticos.

Tabla 22

Parámetros geotécnicos de talud María Reiche

Danématra	Símhala	COV (%)	Inded	Valor
Parametro	SIIIDOIO	Mín	Máx	Unidad	medio
Cohesión	c'	20.00	33.33	KN/m ²	55.00
Peso específico	γ'	3.00	8.00	KN/m ³	21.00
Ángulo de fricción	φ'	3.70	10.10	-	40°

Tabla 23

Parámetros sísmicos de talud María Reiche

Parámetro	Símbolo	Condición		
	51110010	Estática	Pseudoestática	
Coeficiente sísmico horizontal	K _h	0.00	0.20	
Coeficiente sísmico vertical	K _v	0.00	0.00	

La síntesis de los resultados obtenidos en los análisis de estabilidad y confiabilidad de los taludes sintéticos diseñados y talud María Reiche se presentan y discuten en el Capítulo 4.

3.3 Limitaciones

Considerando las limitaciones de tiempo, recursos económicos y la disponibilidad de softwares avanzados, esta investigación se enmarca en el diseño y análisis bidimensional de la estabilidad de taludes sintéticos a partir de un caso de referencia, tomado como base para generar cambios en la geometría, de tal manera que sea posible ejemplificar la metodología aplicada en los análisis de los mismos, en las condiciones estática y pseudoestática, mediante métodos de equilibrio límite. Estos análisis solo contemplan el criterio de superficies de falla circular en taludes de suelo homogéneo. No se considera el efecto de la precipitación, la existencia de sobrecargas estáticas, la ocurrencia de deformaciones, ni la variación espaciotemporal de las propiedades geotécnicas. Los modelos propuestos se sometieron a 10000 simulaciones numéricas para determinar los factores de seguridad (FS), probabilidades de falla (PF) e índices de confiabilidad (RI), todo ello en un marco de comparación entre las ventajas que ofrecen los análisis de estabilidad desde los enfoques determinístico y probabilístico.

Este mismo procedimiento se aplicó al análisis complementario del talud María Reiche.



Capítulo 4

Resultados y discusión

En este último capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos de los análisis de estabilidad y confiabilidad de los taludes sintéticos y el talud real María Reiche, para interpretar los hallazgos relacionados a los objetivos planteados en esta investigación y verificar la correspondencia con las hipótesis formuladas, a partir de la revisión bibliográfica y demás consideraciones en la modelación, cálculos y aplicación de la metodología de trabajo.

El objetivo general de este estudio se cumplió al evaluar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, mediante métodos probabilísticos, en el análisis de la estabilidad de taludes sintéticos, a partir de la incorporación del estadístico coeficiente de variación. Asimismo, se evaluó un caso histórico con el objeto de complementar el estudio de estabilidad de taludes, desde el enfoque probabilístico, y ofrecer una perspectiva adicional sobre el tema.

4.1 Estabilidad de taludes

El análisis de estabilidad de taludes sintéticos propuestos a partir de un caso de referencia permitió determinar los factores de seguridad correspondientes a cada uno de los escenarios diseñados para las condiciones estática y pseudoestática, y niveles de incertidumbre máximo y mínimo de los parámetros geotécnicos. En la Tabla 24 se presenta el número de combinaciones de variables y condiciones que generaron el total de escenarios analizados.

Tabla 24

Número de escenarios de análisis de taludes sintéticos

Parámetro	Variable	Número de escenarios
Geométrico	Altura y pendiente	3 x 3 = 9
Geotécnico	Suelo homogéneo	1
Condición sísmica	Estático y pseudoestático	2
Nivel de incertidumbre	Mínimo y máximo	2
	Total	36

Nota. El total de escenarios es el producto de los escenarios generados por cada parámetro

Los FS obtenidos se determinaron a partir del análisis de estabilidad de taludes con distintas alturas, pendientes, incertidumbre, sismicidad y métodos numéricos. Se obtuvieron factores determinísticos y medios. Los primeros, se refieren al valor calculado cuando todos los parámetros de entrada corresponden al valor medio, esto es, el análisis tradicional; los segundos, al valor promedio calculado a partir de los FS del análisis probabilístico.

En la Tabla 25 se presenta el resumen de resultados de los análisis, que dan cuenta de los FS determinísticos y probabilísticos obtenidos para todas las condiciones de análisis de estabilidad y confiabilidad (distinta geometría, incertidumbre, método numérico y sismicidad).

Tabla 25

		Condición estática			Condición pseudoestática				
Casas	To a suti dance la ca	Spence	er	M-P		Spence	er	M-P	
Casos	Incertidumbre	FSd	FSm	FSd	FSm	FSd	FSm	FSd	FSm
1A	CV mín	2.364	2.365	2.363	2.365	1.480	1.481	1.483	1.480
	CV máx	2.364	2.375	2.363	2.374	1.480	1.488	1.483	1.487
1B	CV mín	1.608	1.604	1.602	1.602	1.151	1.152	1.145	1.151
	CV máx	1.608	1.610	1.602	1.609	1.151	1.152	1.145	1.156
1C	CV mín	1.189	1.126	1.192	1.107	<u>0.965</u>	1.051	<u>0.909</u>	<u>0.875</u>
	CV _{máx}	1.189	1.080	1.192	1.051	<u>0.965</u>	1.113	<u>0.909</u>	<u>0.739</u>
2A	CV mín	1.894	1.893	1.892	1.894	1.178	1.178	1.179	1.181
	CV máx	1.894	1.901	1.892	1.901	1.178	1.185	1.179	1.185
2B	CV mín	1.214	1.211	1.210	1.210	<u>0.849</u>	<u>0.856</u>	<u>0.849</u>	<u>0.854</u>
	CV máx	1.214	1.216	1.210	1.215	<u>0.849</u>	<u>0.857</u>	<u>0.849</u>	<u>0.858</u>
2C	CV mín	<u>0.849</u>	<u>0.863</u>	<u>0.850</u>	<u>0.855</u>	<u>0.673</u>	<u>0.638</u>	<u>0.629</u>	<u>0.599</u>
	CV máx	<u>0.849</u>	<u>0.847</u>	<u>0.850</u>	<u>0.853</u>	<u>0.673</u>	<u>0.620</u>	<u>0.629</u>	<u>0.581</u>
3A	CV mín	1.713	1.711	1.712	1.710	1.060	1.067	1.060	1.062
	CV máx	1.713	1.718	1.712	1.718	1.060	1.071	1.060	1.066
3B	CV mín	1.056	1.056	1.056	1.055	<u>0.738</u>	<u>0.741</u>	<u>0.737</u>	<u>0.740</u>
	CV máx	1.056	1.060	1.056	1.060	<u>0.738</u>	<u>0.744</u>	<u>0.737</u>	<u>0.743</u>
3C	CV mín	<u>0.724</u>	<u>0.725</u>	<u>0.721</u>	<u>0.724</u>	<u>0.538</u>	<u>0.512</u>	<u>0.525</u>	<u>0.522</u>
	CV máx	<u>0.724</u>	<u>0.725</u>	<u>0.721</u>	<u>0.726</u>	<u>0.538</u>	<u>0.504</u>	<u>0.525</u>	<u>0.511</u>

Resultados de estabilidad de taludes sintéticos

Nota La denominación numérica corresponde a las alturas (10m, 20m, 30m); la alfabética, a pendientes (0.50, 1.00, 2.00). Los FS subrayados señalan inestabilidad (FS<1)

En vista de los resultados, no se aprecian diferencias significativas entre los FS determinísticos y probabilísticos; en todo caso, se presentan desde el orden de las centésimas, y dan cuenta de una aparente relación lineal. En razón de ello, se opta por representar los valores con las condiciones menos favorables, es decir, los resultados para el nivel de incertidumbre máximo y método numérico menos conservador (Morgenstern-Price), tanto para la condición estática, como pseudoestática. La Figura 24 y Figura 25 presentan la relación existente entre los FS determinísticos y probabilísticos (valor medio), según lo mencionado.

Figura 24



Relación FS, condición estática (método M-P)



Relación FS, condición pseudoestática (método M-P)

Así mismo, es posible establecer una relación entre la geometría que adoptan los modelos sintéticos, en cuanto a pendientes y alturas, y el factor de seguridad determinado para cada escenario. En la Figura 26 y Figura 27 se presenta la relación entre los factores de seguridad determinísticos y altura, para cada pendiente de los modelos evaluados, en las condiciones estática y pseudoestática, mediante el método numérico de Morgenstern-Price.

Figura 26



Relación FSd y H, condición estática (método M-P)



Relación FSd y H, condición pseudoestática (método M-P)

Según los gráficos presentados, las líneas de tendencia entre las variables sugieren una relación inversa entre el FS determinístico y la altura de los modelos, así como una relación directa entre FS y pendiente de los taludes. Así mismo, se evidencia que el espectro de FS se reduce al evaluar la condición pseudoestática de los modelos. Mientras que en la condición estática el 22% de escenarios son inestables, en la condición pseudoestática lo son el 78%.

Del mismo modo, en la Figura 28 y Figura 29 se presenta la relación entre los factores de seguridad probabilísticos (FS_m) y altura, para cada pendiente de los modelos evaluados, en las condiciones estática y pseudoestática, según el método numérico de Morgenstern-Price.

Figura 28

Figura 27






Relación FSm y H, condición pseudoestática (método M-P)

En este caso, los gráficos presentan una situación similar a la descrita anteriormente, en razón de las mínimas diferencias entre los factores determinísticos y probabilísticos. De igual modo se aprecia la relación inversa entre el FS y H de los modelos, así como la relación directa entre FS y ángulo de pendiente. En este punto, al comparar solo factores de seguridad, no es posible establecer diferencias entre los enfoques determinísticos y probabilísticos, ni tampoco se puede advertir el efecto de la incertidumbre al analizar la estabilidad de los taludes, prescindiendo de los resultados adicionales que reportaría un análisis de confiabilidad.

Figura 29

4.1.1 Estabilidad de talud María Reiche

El análisis de estabilidad del talud en mención se efectuó siguiendo la metodología de evaluación de los modelos sintéticos, según las condiciones de contorno y consideraciones descritas en la sección 3.2.2. En ese sentido, se analizó la propuesta de corte para la estabilización del talud obtenido de Mendoza (2016), con el objeto de ofrecer una perspectiva adicional al tema de estudio y complementar el análisis determinístico con los resultados obtenidos al evaluar este caso, desde un enfoque de análisis probabilístico. Las figuras siguientes representan los resultados para cada una de las condiciones y escenarios señalados.

Figura 30





Figura 31

Talud María Reiche, condición estática, mínima incertidumbre (M-P)



Talud María Reiche, condición estática, máxima incertidumbre (Spencer)

Safety Factor 0.000 0.500 1.000	
2.000	
3.000	
4.000 4.500 5.000	FS (deterministic) = 1.543 FS (mean) = 1.461 FP = 0.739%
5.500 6.000+	Ri (norma)) = 2.513 Ri (lognormal) = 2.969

Figura 33

Talud María Reiche, condición estática, máxima incertidumbre (M-P)



Talud María Reiche, condición pseudoestática, mínima incertidumbre (Spencer)



Figura 35

Talud María Reiche, condición pseudoestática, mínima incertidumbre (M-P)



Talud María Reiche, condición pseudoestática, máxima incertidumbre (Spencer)



Figura 37

Talud María Reiche, condición pseudoestática, máxima incertidumbre (M-P)



En la Tabla 26 se muestra el resumen de resultados de los análisis antes presentados de forma gráfica, para las condiciones estática y pseudoestática, niveles de incertidumbre mínimo y máximo, y métodos numéricos de análisis, según Spencer y Morgenstern-Price.

Tabla 26

		Condición estática				Condición pseudoestática				
Caso	Incertidumbre	Spencer		M-P		Spencer		M-P		
		FSd	FSm	FSd	FSm	FSd	FSm	FSd	FSm	
María Reiche	CV mín	1.543	1.495	1.549	1.478	1.286	1.338	1.246	1.194	
	CV máx	1.543	1.461	1.549	1.445	1.286	1.390	1.246	1.192	

Resultados de estabilidad de talud María Reiche

Los resultados obtenidos se asemejan a los factores calculados en Mendoza (2016), donde concluye que, en efecto, la propuesta de corte presenta una estabilidad aceptable, de acuerdo a los requerimientos mínimos expresados en normativas nacionales e internacionales. Es decir, valores de FS > 1.25, para la condición de análisis estático, y valores de FS > 1.10, para la condición de análisis pseudoestático. En Mendoza (2016), los análisis reportan factores de seguridad de 1.553 y 1.217, para las condiciones estática y pseudoestática, respectivamente. Si comparamos los escenarios de incertidumbre, la diferencia máxima entre los FS calculados, es del orden de las centésimas (0.052), es decir, una diferencia menor a 4.00%; asimismo, la relación entre los factores (FSd/FSm) para cada condición y método, varía entre 0.925 y 1.072. Sin embargo, estos resultados solo responden a la consideración de la estabilidad del talud, pero no ofrecen información referente a la confiabilidad del mismo, al margen de la rigurosidad de los métodos y modelos de estudio. Por ello, del mismo modo que en los taludes sintéticos, no es posible diferenciar los efectos de los niveles de incertidumbre en la estabilidad, presentes en la variabilidad de las propiedades geotécnicas evaluadas en esta investigación.

Esta influencia de la incertidumbre se apreciará al analizar el talud desde un enfoque probabilístico, es decir, al evaluar la confiabilidad del talud mediante los métodos de LHS y FOSM, determinando las probabilidades de falla de las estructuras y el índice de confiabilidad asociado a las mismas. Los resultados generados desde ese enfoque, en conjunto con los factores de seguridad, permitirán complementar los análisis, visualizar un panorama más amplio sobre el hipotético estado real del talud y definir las conclusiones al respecto, que, o bien difieran de las establecidas con el procedimiento tradicional, o bien las refuercen.

4.2 Confiabilidad de taludes

La evaluación de la confiabilidad de los taludes sintéticos se efectuó mediante los métodos probabilísticos de hipercubo latino (LHS) y primer orden segundo momento (FOSM). El primero, se ejecutó mediante el software Slide, y el segundo, mediante Excel, según los procedimientos y consideraciones descritos en la sección 2.2.4.2. La aplicación de estos métodos permite determinar las probabilidades de falla e índices de confiabilidad del sistema. Así mismo, el método FOSM mide el nivel de contribución de los parámetros geotécnicos sobre la varianza de la función, es decir, la influencia de los mismos sobre la estabilidad y confiabilidad de los modelos analizados. El interés en analizar los taludes desde el enfoque probabilístico, recae sobre la importancia en la seguridad y así adoptar mejores deciciones.

A las variables aleatorias correspondientes a las propiedades geotécnicas se les asignó una función de densidad de probabilidad normal. En la práctica, esto supone que a partir de los resultados del análisis de muestras de suelo, se estimen los parámetros estadísticos que representen ese conjunto de datos y se modelen en un software los diseños de interés a evaluar. En la presente investigación se evaluaron los escenarios de mínima y máxima incertidumbre de los parámetros geotécnicos, condiciones representadas mediante un coeficiente de variación que relaciona la desviación estándar y valor medio de cada propiedad, según lo referido en la Tabla 5Tabla 5, sección 2.2.4.1. Con estas consideraciones, se analizaron los modelos y se determinaron los FS. Esto permitió verificar, además de la estabilidad, la confiabilidad de estos.

La elección arbitraria del número de iteraciones en el análisis de confiabilidad responde a los criterios de convergencia y afinidad que se pretenda en los resultados; en este trabajo se consideraron 10000 iteraciones. En la Figura 38 se presenta, a modo de referencia, los resultados de un talud sintéticos analizado, a partir del cual se verifica la convergencia del valor promedio de los factores de seguridad probabilísticos de las simulaciones ejecutadas en Slide.

Figura 38



FS (promedio) - Caso 2C, mínima incertidumbre, estático

Del mismo modo, en la Figura 39 se presentan los resultados de convergencia de las desviaciones estándar de los FS probabilísticos calculados, para el escenario antes mencionado.

Figura 39

FS (desviación estándar) - Caso 2C, CV mín., estático



En ambos gráficos se aprecia que, a partir de las 500 iteraciones, los valores convergen. Este comportamiento se presenta en todos los escenarios evaluados. Estos muestreos de datos aleatorios, generados por el método LHS, supone una distribución de probabilidades más uniforme, en comparación con Monte Carlo (Hernández y Torres, 2020; Pérez, 2018; Prada, et al., 2011; Baecher y Christian, 2003; Lacasse y Nadim, 1998). Ello da cuenta de las ventajas del método de LHS, frente al tradicional método de Monte Carlo, reduciendo tiempo y costos. Así mismo, esta convergencia se presenta al evaluar las probabilidades de falla. A modos de referencia, se presentan los resultados del talud sintético denominado Caso 2C.



Figura 40

Probabilidad de falla - Caso 2C, CV mín., estático

La evaluación de la convergencia es determinante al momento de analizar taludes, porque nos ofrece la posibilidad de reajustar las condiciones de análisis numérico sin afectar significativamente los resultados iniciales. Estos reajusten responden a la necesidad de reducir el número de iteraciones, con el objeto de optimizar recursos en tiempo y costos, o aumentarlo, con la intención de mejorar la precisión. En análisis de volúmenes pequeños de datos estas diferencias son imperceptibles, por lo que en esta investigación se prioriza la afinidad del cálculo y se opta por un número de iteraciones superior a lo requerido. En Tabla 27 y Tabla 28 se presentan los resúmenes de resultados del análisis de confiabilidad de los taludes sintéticos evaluados, para las condiciones estática y pseudoestática, respectivamente.

Tabla 27

		Condición estática								
			Spe	ncer			Μ	-P		
Casos	Incertidumbre	FSd	FSm	Pf (%)	RI-n	FSd	FSm	Pf (%)	RI-n	
1A	CV mín	2.364	2.365	0.000	7.351	2.363	2.365	0.000	7.361	
	CV máx	2.364	2.375	0.000	3.942	2.363	2.374	0.000	3.944	
1B	CV mín	1.608	1.604	0.000	3.844	1.602	1.602	0.000	3.843	
	CV _{máx}	1.608	1.610	1.220	2.177	1.602	1.609	1.250	2.174	
1C	CV mín	1.189	1.126	10.46	1.316	1.192	1.107	12.25	1.205	
	CV _{máx}	1.189	1.080	31.69	0.448	1.192	1.051	36.21	0.309	
2A	CV mín	1.894	1.893	0.000	7.569	1.892	1.894	0.000	7.572	
	CV _{máx}	1.894	1.901	0.000	3.729	1.892	1.901	0.000	3.730	
2B	CV mín	1.214	1.211	1.240	2.212	1.210	1.210	1.260	2.208	
	CV máx	1.214	1.216	11.55	1.211	1.210	1.215	11.59	1.206	
2C	CV mín	<u>0.849</u>	0.863	98.52	-2.20	0.850	0.855	96.58	-1.87	
	CV máx	<u>0.849</u>	<u>0.847</u>	89.17	-1.16	<u>0.850</u>	<u>0.853</u>	85.92	-1.08	
3A	CV mín	1.713	1.711	0.000	7.220	1.712	1.710	0.000	7.216	
	CV _{máx}	1.713	1.718	0.020	3.409	1.712	1.718	0.020	3.409	
3B	CV mín	1.056	1.056	21.64	0.770	1.056	1.055	22.18	0.752	
	CV máx	1.056	1.060	33.88	0.423	1.056	1.060	34.08	0.418	
3C	CV mín	0.724	0.725	100.0	-4.64	0.721	0.724	100.0	-4.60	
	CV máx	0.724	0.725	99.27	-2.51	0.721	0.726	99.08	-2.48	

Confiabilidad de taludes sintéticos, condición estática (LHS)

Nota. La denominación numérica corresponde a las alturas (10m, 20m, 30m); la alfabética, a pendientes (0.50, 1.00, 2.00). Los FS subrayados señalan la condición inestable (FS<1)

		Condición pseudoestática									
		Spence	er			M-P					
Casos	Incertidumbre	FSd	FSm	Pf (%)	RI-n	FSd	FSm	Pf (%)	RI-n		
1A	CV mín	1.480	1.481	0.000	4.009	1.483	1.480	0.000	3.990		
	CV máx	1.480	1.488	1.120	2.184	1.483	1.487	1.190	2.178		
1 B	CV mín	1.151	1.152	7.720	1.420	1.145	1.151	8.740	1.356		
	CV máx	1.151	1.152	20.97	0.803	1.145	1.156	21.49	0.780		
1C	CV mín	<u>0.965</u>	1.051	32.61	0.561	<u>0.909</u>	<u>0.875</u>	98.05	-1.23		
	CV máx	<u>0.965</u>	1.113	26.12	0.666	<u>0.909</u>	<u>0.739</u>	88.06	-1.03		
2A	CV mín	1.178	1.178	0.720	2.350	1.179	1.181	0.700	2.386		
	CV máx	1.178	1.185	11.78	1.204	1.179	1.185	11.70	1.206		
2B	CV mín	<u>0.849</u>	<u>0.856</u>	98.06	-2.11	<u>0.849</u>	<u>0.854</u>	97.64	-2.04		
	CV máx	<u>0.849</u>	<u>0.857</u>	86.60	-1.11	<u>0.849</u>	<u>0.858</u>	85.87	-1.07		
2C	CV mín	<u>0.673</u>	<u>0.638</u>	100.0	-9.28	<u>0.629</u>	<u>0.599</u>	100.0	-9.12		
	CV máx	<u>0.673</u>	<u>0.620</u>	100.0	-4.56	<u>0.629</u>	<u>0.581</u>	100.0	-4.78		
3A	CV mín	1.060	1.067	15.18	1.049	1.060	1.062	16.57	0.979		
	CV máx	1.060	1.071	29.90	0.531	1.060	1.066	31.14	0.495		
3B	CV mín	<u>0.738</u>	<u>0.741</u>	100.0	-4.81	<u>0.737</u>	<u>0.740</u>	100.0	-4.89		
	CV máx	<u>0.738</u>	<u>0.744</u>	99.12	-2.47	<u>0.737</u>	<u>0.743</u>	99.15	-2.49		
3C	CV mín	<u>0.538</u>	<u>0.512</u>	100.0	-15.9	<u>0.525</u>	<u>0.522</u>	100.0	-11.4		
	CV máx	<u>0.538</u>	<u>0.504</u>	100.0	-7.72	<u>0.525</u>	<u>0.511</u>	100.0	-6.33		

Confiabilidad de taludes sintéticos, condición pseudoestática (LHS)

Tabla 28

Nota. La denominación numérica corresponde a las alturas (10m, 20m, 30m); la alfabética, a pendientes (0.50, 1.00, 2.00). Los FS subrayados señalan la condición inestable (FS<1). La denominación Pf y RI indican probabilidad de falla e índice de confiabilidad, respectivamente.

Al observar los resultados, se puede constatar que, en la condición de análisis estático, el nivel de incertidumbre afecta significativamente en los valores de probabilidad de falla, aunque este efecto no se logre apreciar en los factores de seguridad. El mismo comportamiento ocurre en la condición de análisis pseudoestático. Así mismo, se observan taludes sintéticos estables, con FS>1, y, sin embargo, presentan valores de considerable probabilidad de falla. Para una evaluación preliminar en conjunto de la estabilidad y confiabilidad, con un valor de referencia de FS> 1, y RI>2.5, respectivamente, la mayoría de secciones analizadas no cumplirían ambos criterios y correspondería intervenir en su estructura para mejorar su estado.

Incluso en los escenarios menos críticos, se verifica que el nivel de incertidumbre influye considerablemente sobre la probabilidad de falla. Así se tiene, por ejemplo, el caso 1B, en donde la probabilidad en condición estática, varía de 0.0% para la mínima incertidumbre, a 1.25%, para la máxima, mientras que en la condición pseudoestática, el rango está entre 8.74% y 21.49%. En la Figura 41 se aprecia esta relación, frente a la propuesta del USACE.

Figura 41



Relación entre RI-n y PF, taludes sintéticos

Teniendo en cuenta estas observaciones, se procedió a verificar que los taludes cumplan los requerimientos mínimos, según las normativas, tanto de estabilidad, como de confiabilidad, considerando los resultados del método de Morgenstern-Price. En Tabla 29 se presenta el resumen de la evaluación de resultados de los casos que cumplen al menos un criterio.

Tabla 29

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Casos	T	Condición está	ática	Condición pseudoestática		
Casos	Incertidumbre	FS>1.25	RI-n ≥ 3	FS>1.10	RI-n≥ 3	
1A	CV mín	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	
	CV máx	Cumple	Cumple	Cumple	-	
1B	CV mín	Cumple	Cumple	Cumple	-	
	CV máx	Cumple	-	Cumple	-	
2A	CV mín, máx	Cumple	Cumple	Cumple	-	
3A	CV mín, máx	Cumple	Cumple	-	-	

Nota. Los casos que no figuran en esta tabla no cumplen ninguna condición

La determinación de la probabilidad de falla e índice de confiabilidad de los taludes sintéticos también se efectuó por el método FOSM, según las consideraciones descritas en la sección 2.2.4.2, a partir de la base de datos proporcionada por el muestreo generado en Slide. En la Tabla 30 se presenta el resumen de resultados por este método, según Morgenstern-Price, para las condiciones de análisis estático y pseudoestático de los taludes sintéticos propuestos.

Tabla 30

(1 · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·										
		Método	de Morger	nstern-Pric	e					
Casa	Incortidumbro	Condició	on estática		Condició	on pseudoe	estática			
Caso	meendumbre	FSm	PF (%)	RI-n	FSm	PF (%)	RI-n			
1A	CV mín	2.363	0.000	7.388	1.483	0.002	4.126			
	CV máx	2.363	0.015	3.953	1.483	1.304	2.228			
1B	CV mín	1.602	0.002	4.066	1.145	10.64	1.258			
	CV máx	1.602	1.160	2.269	1.145	24.27	0.708			
10	CV	1 102	o 200	1 205	0.000	100.0	0.62			
IC .	CV_{min}	1.192	0.399	1.395	0.909	100.0	-0.02			
	CV máx	1.192	21.25	0.805	0.909	83.35	-0.37			
2A	CV mín	1.892	0.000	7.035	1.179	0.749	2.411			
	CV máx	1.892	0.069	3.507	1.179	11.79	1.196			
2B	CV mín	1.210	1.307	2.227	<u>0.849</u>	100.0	-2.22			
	CV máx	1.210	11.83	1.194	<u>0.849</u>	100.0	-1.20			
20	CU	0.050	400.0	2.00	0.000	400.0	5 00			
2C	CV mín	0.850	100.0	-2.00	0.629	100.0	-5.20			
	CV _{máx}	<u>0.850</u>	100.0	-1.11	<u>0.629</u>	100.0	-2.97			
3 Δ	CV m/m	1 712	0.000	7 231	1 060	17 39	0 945			
511		1 712	0.000	2 27/	1.000	22.20	0.545			
	C V max	1.712	0.007	5.574	1.000	55.65	0.450			
3B	CV mín	1.056	20.25	0.839	<u>0.737</u>	100.0	-5.36			
	CV máx	1.056	35.22	0.419	<u>0.737</u>	100.0	-2.76			
3C	CV mín	<u>0.721</u>	100.0	-5.01	<u>0.525</u>	100.0	-10.30			
	CV máx	<u>0.721</u>	100.0	-2.69	<u>0.525</u>	100.0	-5.667			

Confiabilidad de taludes sintéticos, Morgenstern-Price (FOSM)

Nota. La denominación numérica corresponde a las alturas (10m, 20m, 30m); la alfabética, a pendientes (0.50, 1.00, 2.00). Los FS subrayados señalan la condición inestable (FS<1). La denominación Pf y RI indican probabilidad de falla e índice de confiabilidad, respectivamente.

Al establecer comparaciones entre los métodos de LHS y FOSM, considerando los resultados determinados por Morgenstern-Price, conviene efectuarlas mediante los índices de confiabilidad, que relacionan factores de seguridad y desviaciones estándar de los mismos, además de estar asociados a las probabilidades de falla y ser adimensionales.

En la Tabla 31 se presentan los índices de confiabilidad obtenidos por cada método probabilístico en el análisis de los taludes sintéticos propuestos a evaluación en este trabajo.

Tabla 31

		Índices de confiabilidad (RI-n)								
C	T (*1 1	Condici	ón estática		Condici	ón pseudo	estática			
Caso	so incertidumbre		FOSM	r	LHS	FOSM	r			
1A	CV mín	7.361	7.388	1.004	3.990	4.126	1.034			
	CV máx	3.944	3.953	1.002	2.178	2.228	1.023			
1B	CV mín	3.843	4.066	1.058	1.356	1.258	0.928			
	CV máx	2.174	2.269	1.044	0.780	0.708	0.908			
1C	CV mín	1.205	1.395	1.158	-1.226	-0.62	0.504			
	CV máx	0.309	0.805	2.605	-1.029	-0.37	0.355			
2A	CV mín	7.572	7.035	0.929	2.386	2.411	1.010			
	CV máx	3.730	3.507	0.940	1.206	1.196	0.991			
2B	CV mín	2.208	2.227	1.009	-2.040	-2.22	1.089			
	CV máx	1.206	1.194	0.990	-1.074	-1.20	1.121			
2C	CV mín	-1.874	-2.00	1.070	-9.115	-5.20	0.570			
	CV máx	-1.077	-1.11	1.036	-4.778	-2.97	0.620			
3A	CV mín	7.216	7.231	1.002	0.979	0.945	0.965			
	CV máx	3.409	3.374	0.990	0.495	0.450	0.910			
3B	CV mín	0.752	0.839	1.116	-4.889	-5.36	1.097			
	CV máx	0.418	0.419	1.003	-2.493	-2.76	1.105			
3C	CV mín	-4.597	-5.01	1.090	-11.345	-10.30	0.908			
	CV máx	-2.478	-2.69	1.084	-6.334	-5.667	0.895			

Índices de confiabilidad de taludes sintéticos, Morgenstern-Price (LHS, FOSM)

Nota. La denominación numérica corresponde a las alturas (10m, 20m, 30m); la alfabética, a pendientes (0.50, 1.00, 2.00). Los FS subrayados señalan la condición inestable (FS<1). El parámetro "r" indica la relación entre los índices de confiabilidad obtenidos por FOSM y LHS.

Se verifica que los índices obtenidos por el método de FOSM son, en su mayoría, más conservadores en relación a los de LHS. Estas diferencias se acentúan cuando se evalúan las condiciones más críticas, en relación a la geometría y escenarios de sismicidad. La Figura 42 presenta la relación existente entre los índices de confiabilidad obtenidos para cada método probabilístico, diferenciando las condiciones de análisis estático y pseudoestático.

Figura 42



Relación entre RI-n (FOSM) y RI-n (LHS), taludes sintéticos

Existe una relación aparentemente lineal entre los índices de confiabilidad de los taludes sintéticos evaluados en condición estática. Sin embargo, esta relación se altera al evaluar la condición pseudoestática, donde en algunos escenarios los índices difieren considerablemente. Este fenómeno se acentúa cuanta mayor altura y mayor pendiente presenta el talud sintético.

4.2.1 Confiabilidad de talud María Reiche

Se evaluó la confiabilidad de la propuesta de corte para la estabilización del talud María Reiche, sobre la base de información obtenida de Mendoza (2016), y consideraciones adicionales para esta investigación, expuestas en la sección 3.2.2. El procedimiento de análisis es similar al aplicado en la evaluación de los taludes sintéticos. El talud fue evaluado desde el enfoque probabilístico, para las condiciones estática y pseudoestática, y niveles de incertidumbre máxima y mínima. Se verificó, además, la convergencia de los resultados, en función al número de iteraciones adoptadas para el análisis mediante el software Slide.

En la Figura 43, Figura 44, Figura 45 y Figura 46 se presentan los resultados de convergencia de los FS promedio y desviación estándar, calculados para la condición estática.



Figura 43



Figura 44





FS (desviación estándar) – Estático, CV mín.



Figura 46

FS (desviación estándar) – Estático, CV máx.



Del mismo modo, en la Figura 47, Figura 48, Figura 49 y Figura 50 se presentan los resultados de convergencia determinados para las condiciones de análisis pseudoestático.

Figura 47

FS (promedio) - Pseudoestático, CV mín.



Figura 48

FS (promedio) – Pseudoestático, CV máx.



FS (desviación estándar) - Pseudoestático, CV mín.



Figura 50

FS (desviación estándar) - Pseudoestático, CV máx.



Los gráficos anteriores permiten verificar que los resultados convergen, y que esta convergencia ocurre a partir de un valor de 500 iteraciones en el cálculo del factor de seguridad. El reajuste de esta condición al momento de ejecutar los análisis dependerá del criterio del profesional y los requerimientos del caso de estudio en que esté enfocado. En el análisis del talud María Reiche se mantienen las condiciones iniciales de análisis, por lo que se procede a presentar los resultados del estudio en términos de confiabilidad. En la Tabla 32 y Tabla 33 se presenta el resumen de resultados del talud, evaluado con los métodos de Spencer y Morgenstern-Price, respectivamente, para las condiciones estática y pseudoestática.

		1	I (,							
Método de Spencer											
Caso	Incertidumbre	Condici	ón estática		Condición pseudoestática						
		FSm	PF (%)	RI-n	FSm	PF (%)	RI-n				
María Reiche	CV mín	1.495	0.000	4.752	1.338	0.000	2.832				
	CV máx	1.461	0.738	2.513	1.390	1.471	2.003				

Tabla 32 Confiabilidad de talud María Reiche, por Spencer (LHS)

Tabla 33

Confiabilidad de talud María Reiche, por Morgenstern-Price (LHS)

		Método de Morgenstern-Price								
Caso	Incertidumbre	Condició	ón estática		Condición pseudoestática					
		FSm	PF (%)	RI-n	FSm	PF (%)	RI-n			
María Reiche	CV mín	1.478	0.000	4.799	1.194	0.997	2.487			
	CV máx	1.445	0.881	2.469	1.192	10.461	1.193			

Al observar los resultados, se identifica que el método de Spencer ofrece los valores de FS más conservadores. En ese sentido, conviene trabajar con lo reportado por Morgenstern-Price, con el objeto de adecuar los diseños a la situación más crítica. Asimismo, se puede constatar que, en la condición de análisis estático, aunque el nivel de incertidumbre afecta en menor medida la probabilidad de falla, ocurre un cambio significativo al analizar el mismo escenario en condición pseudoestática. Así se tiene, por ejemplo, que por Morgenstern-Price, en la condición de análisis estático, la PF varía entre 0.000% y 0.881% para niveles de incertidumbre mínimo y máximo, respectivamente, pero este rango se incrementa en la condición pseudoestática, a valores de PF entre 0.997% y 10.461%. Así también, al evaluar el nivel de desempeño esperado del talud María Reiche, en términos de índices de confiabilidad, según la Tabla 6, el escenario menos crítico presenta un RI-n = 4.799, es decir, un nivel de desempeño bueno en condición de análisis estático y mínima incertidumbre. Sin embargo, este índice disminuye hasta un RI-n = 2.469 cuando se presenta un escenario de máxima incertidumbre, lo que se traduce en un nivel de desempeño pobre. Estos efectos se acentúan al evaluar la condición pseudoestática, donde los RI-n son 2.487 y 1.193, es decir, un nivel de desempeño pobre y peligroso, respectivamente, de la sección de talud analizada.

Todos los efectos identificados en los resultados del análisis de confiabilidad del talud María Reiche no serían posibles de apreciar solo desde un enfoque de análisis determinístico, donde se reportaron FS similares. Estos varían en menos de 4.00% entre uno y otro escenario. Estos mismos efectos y comportamiento se verificaron en los análisis de los taludes sintéticos. En la Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Figura 54 se presentan los resultados de convergencia de la probabilidad de falla para los distintos escenarios, métodos y condiciones evaluadas.

Probabilidad de falla - María Reiche, CV mín., estático.



Figura 52

Probabilidad de falla - María Reiche, CV máx., estático.



Probabilidad de falla María Reiche, CV mín., pseudoestático.



Figura 54

Probabilidad de falla María Reiche, CV máx., pseudoestático.



Del mismo modo como en el reporte de la convergencia de los valores promedio y desviación estándar de los FS, se verifica la convergencia de la probabilidad de falla del talud María Reiche. El método de Spencer reporta valores mayores de PF, en comparación a Morgenstern-Price, esto guarda relación con los FS calculados en los análisis para cada método. La condición más crítica, según el resumen presentado en la Tabla 33 corresponde al escenario de máxima incertidumbre evaluado en condición pseudoestática, mediante Morgenstern-Price. El valor de PF reportado se aproxima a 11%, que se puede interpretar como que, de cada 100m de talud, es probable que al menos 11m del mismo fallen. En términos de volumen de material que se precipitaría hacia las vías aledañas nos revela una perspectiva que resulta preocupante.

La determinación de la probabilidad de falla e índice de confiabilidad de los taludes sintéticos también se efectuó por el método FOSM, según las consideraciones descritas en la sección 2.2.4.2, a partir de la base de datos proporcionada por el muestreo generado en Slide. En la Tabla 34 se presenta el resumen de resultados por este método, según Morgenstern-Price, para las condiciones de análisis estático y pseudoestático del talud María Reiche.

Tabla 34

		Método de Morgenstern-Price									
Caso	Incontidumbro	Condicio	ón estática		Condición pseudoestática						
	mcertidumbre	FSm	PF (%)	RI-n	FSm	PF (%)	RI-n				
María Reiche	CV mín	1.549	1.337	2.219	1.246	41.29	0.287				
	CV máx	1.549	10.04	1.292	1.246	47.45	0.167				

Confiabilidad de talud María Reiche, por Morgenstern-Price (FOSM)

Nota. La denominación PF y RI son probabilidad de falla e índice de confiabilidad.

Así mismo, en la Tabla 35 se presentan los índices de confiabilidad obtenidos por cada método probabilístico en el análisis del talud María Reiche, con el objeto de establecer comparaciones entre los métodos de LHS y FOSM, considerando los resultados determinados por Morgenstern-Price, mediante los índices de confiabilidad, que relacionan factores de seguridad y desviaciones estándar de los mismos, asociados a probabilidades de falla.

Tabla 35

Índices de confiabilidad, talud María Reiche, por Morgenstern-Price

	Índices de confiabilidad (RI-n)										
Caso	In conti duna hac	Condici	ón estática	l	Condición pseudoestática						
	incertidumbre	LHS	FOSM	r	LHS	FOSM	r				
María Reiche	CV mín	4.799	2.219	0.462	2.487	0.287	0.115				
	CV máx	2.469	1.292	0.523	1.193	0.167	0.140				

Nota. El parámetro "r" indica la relación entre índices obtenidos por FOSM y LHS.

Los índices de confiabilidad varían considerablemente entre uno y otro método, estas diferencias se acentúan en la condición de análisis pseudoestático, donde los índices calculados por el método FOSM representan un valor aproximado del 11% del índice obtenido por LHS. Estas notables discrepancias, en comparación a los resultados obtenidos en el análisis de los taludes sintéticos, podrían responder directamente a los valores de las propiedades geotécnicas.

Al mantener los mismos rangos de variación, las desviaciones estándar obtenidas aumentan proporcionalmente a los valores medios de cada parámetro geotécnico, lo que supone valores mayores en términos de varianza de cada uno de estos parámetros. En el cálculo del índice de confiabilidad, la varianza del FS del talud es la suma de las varianzas de cada parámetro geotécnico, por lo que al aumentar estos, afectarán sensiblemente el valor del índice.

Aún con estos resultados, el método FOSM presenta una ventaja adicional que no tienen otros métodos, y es la de proporcionar información útil sobre la contribución relativa de cada variable en la incertidumbre general del sistema (Baecher & Christian, 2003), reflejado en la contribución de las varianzas de los parámetros en la varianza del FS, lo que permite decidir sobre mayores estudios e investigación relativa a esos parámetros de mayor influencia.

C

4.3 Sensibilidad de variables

Mediante la aplicación del método FOSM, se determinó la contribución de cada parámetro geotécnico en la varianza del FS de los taludes sintéticos analizados. La obtención del valor de la varianza se efectuó a partir del muestreo de datos generado por el software Slide. El método se sintetiza en la determinación de FS a partir del incremento en un 10% de cada uno de los parámetros, mientras los restantes mantienen su valor inicial; incrementos menores a 10% no generan diferencias significativas en la precisión del cálculo (Farias & Assis, 1998). Esta operación permite medir la contribución de cada parámetro en la varianza del FS, es decir, determinar la influencia de cada uno sobre la estabilidad de los taludes. Además, este método también permitió calcular el índice de confiabilidad y probabilidad de falla asociada al mismo, según los resultados y comparaciones establecidas en la sección 4.2, sobre confiabilidad.

Los datos del muestreo de parámetros geotécnicos ejecutado en el software Slide se emplearon y procesaron en la aplicación del método FOSM, mediante el software Excel. Teniendo en cuenta que, el método que reporta los resultados menos conservadores en los cálculos corresponde al de Morgenstern-Price, y por tratarse de un método más riguroso que Spencer, se consideró efectuar los análisis a partir de los resultados generados por el primero. En la Tabla 36 presenta el resumen de resultados en porcentaje sobre la contribución de cada uno de los parámetros geotécnicos evaluados sobre la varianza del FS de los taludes sintéticos.

		Contribucion de parámetros						
Cara	Incertidumbre	Condició	on estática		Condición pseudoestática			
Caso		c'	φ'	γ	c'	φ'	γ'	
1A	CV mín	84.60 %	13.84 %	1.570 %	85.94 %	12.20 %	1.860 %	
	CV máx	67.29 %	29.52 %	3.190 %	69.63 %	26.51 %	3.870 %	
1B	CV mín	92.08 %	6.960 %	0.960 %	91.87 %	6.420 %	1.710 %	
	CV máx	79.64 %	16.15 %	4.210 %	80.96 %	15.17 %	3.870 %	
1C	CV mín	95.05 %	3.550 %	1.400 %	98.32 %	1.240 %	0.440 %	
	CV máx	87.89 %	8.800 %	3.310 %	95.66 %	3.250 %	1.100 %	
2A	CV mín	73.27 %	25.68 %	1.060 %	72.33 %	26.15 %	1.527 %	
	CV máx	50.58 %	47.55 %	1.860 %	49.41 %	47.92 %	2.671 %	
2B	CV mín	84.81 %	13.53 %	1.660 %	86.35 %	11.82 %	1.823 %	
	CV máx	67.66 %	28.96 %	3.380 %	70.36 %	25.84 %	3.803 %	
2C	CV mín	90.18 %	8.010 %	1.810 %	93.59 %	5.062 %	1.348 %	
	CV máx	77.54 %	18.48 %	3.980 %	84.61 %	12.28 %	3.119 %	
3A	CV mín	61.08 %	37.87 %	1.040 %	65.25 %	33.70 %	1.051 %	
	CV máx	36.94 %	61.44 %	1.620 %	41.21 %	57.09 %	1.699 %	
3B	CV mín	73.56 %	24.79 %	1.660 %	78.30 %	19.93 %	1.762 %	
	CV máx	50.98 %	46.09 %	2.940 %	57.46 %	39.24 %	3.309 %	
30	CV mín	84.89 %	13.48 %	1.630 %	88.64 %	10.03 %	1.335 %	
	CV máx	67.80 %	28.88 %	3.330 %	74.51 %	22.62 %	2.873 %	

Contribución de parámetros sobre varianza de FS, taludes sintéticos

Tabla 36

Nota. Los parámetros c', \u03c6', \u03c7', son cohesión, ángulo de fricción y peso, respectivamente

Los resultados de contribución de los parámetros geotécnicos revelan que la cohesión y el ángulo de fricción interna presentan la mayor influencia en la varianza del FS de los taludes sintéticos, es decir, afectan significativamente la estabilidad y confiabilidad de las estructuras. En contraste a esta observación, el peso del suelo contribuye mínimamente en este escenario. En la Figura 55 y Figura 56 se visualizan las contribuciones de los parámetros al comparar los resultados de mínima y máxima incertidumbre, para la condición de análisis estático.

Sensibilidad de parámetros, CV mín. (estático).



Figura 56

Sensibilidad de parámetros, CV máx. (estático).



Las gráficas presentan el comportamiento de la contribución de las variables. Se verifica que la contribución de cada parámetro se redistribuye en el escenario de máxima incertidumbre, y este mismo comportamiento varía dependiendo de las variaciones geométricas de los taludes.

En la Figura 57 y Figura 58 se aprecia a modo de áreas de influencia el dominio que ejerce cada parámetro geotécnico sobre la contribución en la varianza del FS de los taludes, al comparar los dos escenarios de incertidumbre, para la condición de análisis estático.

Influencia de parámetros, CV mín. (estático)



Figura 58

Influencia de parámetros, CV máx. (estático)



En ambos escenarios de incertidumbre, el comportamiento de los parámetros es similar. Considerando que el peso no influye significativamente, conviene enfocar el análisis en los otros parámetros. Así se tiene que, para taludes con alturas iguales, la contribución de la cohesión aumenta conforme aumenta la pendiente del talud. En contraste, la contribución del ángulo de fricción interna presenta un comportamiento opuesto, es decir, disminuye conforme aumenta la pendiente. Esta relación con la altura ocurre de manera similar con la pendiente, cuando esta se mantiene constante y solo varían las alturas de los taludes. Del mismo modo como se evaluó el comportamiento de las contribuciones para la condición de análisis estático, se evaluó el comportamiento para la condición pseudoestática. En la Figura 59 y Figura 60 se visualizan los resultados de las contribuciones de los parámetros.



Figura 59

Sensibilidad de parámetros, CV mín. (pseudoestático)

Figura 60

Sensibilidad de parámetros, CV máx. (pseudoestático)



Las gráficas presentan el comportamiento de la contribución de las variables. Se verifica que la contribución de cada parámetro se redistribuye en el escenario de máxima incertidumbre, y este mismo comportamiento varía dependiendo de las variaciones geométricas de los taludes.

En comparación con los resultados en condición de análisis estático, los cambios se acentúan en la evaluación de la condición pseudoestática. Así mismo, se aprecia que, en los escenarios de máxima incertidumbre, tanto en condición estática, como pseudoestática, en algunas configuraciones geométricas la proporción en la contribución de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna se aproximan entre sí, tales son los casos 2A, 3A y 3B.

En la Figura 61 y Figura 62 se aprecia a modo de áreas de influencia el dominio que ejerce cada parámetro geotécnico sobre la contribución en la varianza del FS de los taludes, al comparar los dos escenarios de incertidumbre, para la condición de análisis pseudoestático.

Figura 61

Influencia de parámetros, CV mín. (pseudoestático)



Figura 62

Influencia de parámetros, CV máx. (pseudoestático)



El comportamiento de los parámetros es similar en relación a la evaluación de la condición de análisis estático. Considerando que la altura, o la pendiente, se mantiene constante, la contribución de la cohesión presenta una relación directa, mientras que la contribución del ángulo de fricción interna presenta una relación indirecta.

En la práctica, al evaluar taludes reales, la discusión debería enfocarse en el estudio de los parámetros que presenten la mayor influencia en la estabilidad y confiabilidad de las estructuras de interés, a partir del análisis de los resultados de las simulaciones de las mismas.

4.3.1 Sensibilidad de variables en talud María Reiche

Se determinó, mediante la aplicación del método FOSM, del mismo modo en que se procedió en el análisis de los taludes sintéticos, la contribución de cada parámetro geotécnico en la varianza del FS del talud real denominado María Reiche (MR), es decir, determinar la influencia de cada variable sobre la estabilidad del mismo. Teniendo en cuenta que, el método que reporta los resultados menos conservadores en los cálculos corresponde al de Morgenstern-Price, y por tratarse de un método más riguroso que Spencer, se consideró efectuar los análisis a partir de los resultados generados por el primero. En la Tabla 37 se presenta el resumen de resultados de la contribución de parámetros geotécnicos sobre la varianza del FS del talud.

Contribución de parámetros Condición estática Condición pseudoestática Caso Incertidumbre c' φ' γ' c' φ' γ' CV mín 96.27% 0.670% 3.106% 0.624% 96.16% 3.176% María Reiche CV máx 90.65% 1.612% 7.849% 1.504% 90.38% 8.010%

Tabla 37

C		1		1.	EC	4 - 1 1	N/	D 1
Contribución de	parametros	sobre	varianza	ae	FS,	talua	Maria	Reiche

Los resultados de contribución de los parámetros geotécnicos del talud María Reiche revelan que la cohesión presenta la mayor influencia en la varianza del FS, en un rango de contribución entre 90.38% y 96.27%, en comparación a los rangos correspondientes al ángulo de fricción interna (3.106% y 8.010%), y el peso específico del suelo (0.624% y 1.612%). En la Figura 63 y Figura 64 se visualizan estas contribuciones de los parámetros al comparar los escenarios de incertidumbre, para las condiciones de análisis estático y pseudoestático.

Sensibilidad de parámetros (condición estática) 100.00% 80.00% Contribución (%) 60.00% 40.00% 20.00% 0.00% CV min CV máx cohesión 90.65% 96.27% angulo fricció 3.11% 7.85% peso 0.62% 1.50% Talud María Reiche

Talud María Reiche - Sensibilidad, estático

Figura 64

Talud María Reiche - Sensibilidad, pseudoestático



Las gráficas permiten una mejor visualización del dominio que ejercen los parámetros geotécnicos en la contribución de la varianza del FS, es decir, la influencia sobre la estabilidad. En el caso del talud María Reiche, a diferencia de los taludes sintéticos, la contribución de la cohesión es dominante en los distintos escenarios de incertidumbre y condiciones de análisis.

Es preciso señalar que los resultados de los análisis de esta investigación se consideran preliminares, y, sin embargo, proporcionan un procedimiento mínimo a considerar en estudios. Cuando no se dispone de información, o esta es escasa, conviene apoyarse en referencias disponibles en la literatura que nos provean de un punto de partida, a partir del cual enfocar una investigación más rigurosa, en relación al tipo de proyecto y recursos de que se disponga.

Conclusiones

El diseño de taludes sintéticos, y el estudio complementario de un caso real, permitió cumplir el objetivo principal de la investigación, referido a la evaluación de la incertidumbre de parámetros geotécnicos, mediante métodos probabilísticos, en el análisis de la estabilidad. Los resultados, en los distintos escenarios y condiciones evaluadas, proporcionaron información útil sobre el comportamiento de los taludes, y en ese sentido, en relación a la hipótesis general formulada al inicio, fue posible establecer las siguientes conclusiones:

No se aprecian diferencias significativas entre los factores de seguridad determinístico y probabilístico, por lo que resulta imposible advertir el efecto de la incertidumbre si se prescinde de la información que proporcionan los enfoques de análisis probabilístico.

Los resultados del análisis de taludes permitieron identificar casos en donde se verifica que cumplen los criterios de estabilidad, pero no cumplen los criterios de confiabilidad. Esto significa que, aunque en esos casos los taludes resultan estables, no son confiables.

Se determinó que los parámetros de mayor influencia en la estabilidad de taludes son la cohesión, el ángulo de fricción interna y el peso de suelo, en ese orden de relevancia. Sin embargo, este orden se ve alterado frente a escenarios de incertidumbre y sismo, como se verificó en el caso 3A, donde el ángulo de fricción interna domina la influencia.

Los análisis de confiabilidad aplicados a la evaluación de taludes no garantizan que los diseños que se planteen sobre la base de los resultados nunca fallen, pero sí proporciona un panorama más amplio en la formulación de mejores propuestas de solución.

Recomendaciones

El análisis de taludes supone un amplio espectro de potenciales líneas de investigación en el campo de la ingeniería geotécnica, lo que permite abordar una serie de problemas relacionados a la inestabilidad, desde múltiples enfoques de evaluación, y mediante diversas metodologías.

En relación a la presente investigación, es posible complementar los análisis incorporando al estudio condiciones de contorno y análisis distintos. Esto supone, por ejemplo, geometrías de mayor complejidad, taludes heterogéneos compuestos por estratos con propiedades diferentes, métodos numéricos adicionales o consideraciones de cargas múltiples, pero, además, variaciones en las condiciones de cálculo, como el reajuste del número de iteraciones, tipos de superficies de falla complejas, modelos de fuerza e inclusive evaluaciones tridimensionales.

Así también, estos procedimientos se pueden adecuar al análisis de suelos rocosos, atendiendo los requerimientos necesarios para el estudio de ese tipo de material. Del mismo modo, es posible analizar el comportamiento de otro tipo de estructuras, como presas y suelos reforzados.



Glosario

Análisis estático :	hace referencia al procedimiento por el cual se evalúa la estabilidad de un talud, al determinar la relación existente entre las fuerzas y momentos actuantes, y las fuerzas y momentos requeridos que garanticen el equilibrio de la masa de suelo evaluada, expresado en un parámetro denominado factor de seguridad.
Análisis pseudoestático :	de modo similar a lo referido sobre el análisis estático, este tipo de análisis incorpora los efectos que producen las vibraciones sísmicas, mediante aceleraciones que ocasionan fuerzas inerciales, horizontales o verticales, representadas a través de coeficientes adimensionales.
Confiabilidad	capacidad de que un sistema cumpla de modo satisfactorio las funciones y condiciones para las que fue diseñado, durante un determinado período.
Convergencia	en el campo de la geotecnia y estadística, alude a un valor constante al que tiende un determinado análisis cuantas más iteraciones o experimentos se ejecuten.
Densidad de probabilidades :	hace referencia a la distribución de valores que adopta una determinada variable en una población o muestra.
Desviación estándar :	es un parámetro estadístico que cuantifica la dispersión de un conjunto de datos al calcular las diferencias de cada valor del conjunto respecto al promedio de estos.
Estabilidad	estado de equilibrio de una determinada estructura frente a distintas solicitaciones de esfuerzos estáticos o dinámicos, permanentes o transitorios.
Factor de seguridad :	parámetro adimensional que refiere la relación entre la capacidad de un sistema y las fuerzas actuantes sobre
Incertidumbre :	hace referencia al estado del conocimiento sobre una determinada situación o escenario, del que se tiene escasa o nula información.
Índice de confiabilidad :	parámetro que permite medir la seguridad de un sistema.
Presa :	estructura hidráulica que posibilita el embalse de fuentes de agua para un determinado uso.

Probabilidad de falla	:	en geotecnia, esta expresión representa una fracción del total de escenarios de superficies de talud analizado donde se reportan factores de seguridad menores a uno, es decir, escenarios en condición de inestabilidad.
Sensibilidad de variables	:	consiste en el análisis del impacto que sufre la variable dependiente de un sistema al alterar cada una de las variables independientes que lo conforman, con el objeto de determinar la influencia que estas ejercen.
Suelo	:	en ingeniería, se refiere al material conformado por partículas sólidas rodeadas por espacios, en general ocupados por aire o agua, que pueden ser separadas mediante medios mecánicos simples.
Suelo reforzado		sistema estructural que permite la contención del suelo, con el objeto de conseguir desniveles considerables de terreno, mediante el empleo de elementos externos embebidos en la matriz compactada de suelos de calidad, y que funcionan a tracción.
Talud		hace referencia a la masa de suelo que se caracteriza por tener una superficie externa inclinada con respecto a la horizontal, conformada de manera natural o artificial.
Varianza		parámetro estadístico que mide la dispersión de un conjunto de datos con respecto al promedio de estos, y equivale al cuadrado de la desviación estándar.

Referencias

- Abderrahmane, T. H., & Abdelmadjid, B. (2016). Assessment of slope stability by continuum and discontinuum methods. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architect, 10 (4), 543-548.
- Akbas, B., & Huvaj, N. (2015). Probabilistic slope stability analyses using limit equilibrium and finite element methods. *Geotechnical safety and risk V*, 716-721. https://doi.org/10.3233/978-1-61499-580-7-716.

- Álvarez Pérez, J., Chávez Gómez, J. H., & Mesa Lavista, M. (2020). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terreplanes carreteros altos ante carga sísmica. *Revista de ingeniería sísmica*, 103, 1-17. https://doi.org/10.18867/ris.103.489.
- Angelino Calderón, W. L. (2020). Reducción de parámetros de resistencia al corte para la evaluación de la estabilidad de talud para una presa de relave [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Obtenido de http://repositorio.usil.edu.pe/handle/USIL/10551.
- Babu, G. S., Reddy, K. R., & Srivastava, A. (2014). Influence of spatially variable geotechnical properties of MSW on stability of landfill slopes. *Journal of hazardous, toxic, and radioactive waste*, 18(1), 27-37.
- Baecher, G., & Christian, J. (2003). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. *Chichester: John Wiley & Sons*, 605.
- Banco Mundial (2021). *Gestión del riesgo de desastres*. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de Banco Mundial: http://www.bancomundial.or/es/topic/disasterriskmanagement/overview#2.
- Bangalore, M., Bonzanigo, L., Fay, M., Hallegate, S., Kane, T., Narloch, U., . . . Vogt-Schilb, A. (2016). Shock waves: managing the impacts of climate change of poverty. Climate change and development. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de World Bank: http:// openknowledge.worldbank.org/handle/10986/22787.
- Bangalore, M., Hallegate, S., Rozenberg, J., & Vogt-Schilb, A. (2017). Unbreakable: building the resilience of the poor in the face of natural disasters. Climate change and development. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de World Bank: http:// openknowledge.worldbank.org/handle/10986/25335.

- BBC News. (27 de Noviembre de 2018). Los países del mundo (y de América Latina) con mayor riesgo en caso de sufrir una catástrofe natural. Recuperado el 2 de septiembre de 2021, de https://www.bbc.com/mundo/noticias-internacional-46357919.
- Bhattacharya, G., Jana, D., Ojha, S., & Chakraborty, S. (2013). Direct search for minimum reliability index of earth. *Computers and geotechnics*, 30, 455-462.
- Carbon Brief. (31 de agosto de 2017). *Mapeo: cómo el cambio climático afecta eventos meteorológicos extremos alrededor del mundo*. Recuperado el 15 de septiembre de 2021, de http://www.carbonbrief.org/mapeo-como-el-cambio-climatico-afecta-eventos-meteorologicos-extremos-alrededor-del-mundo.
- Carranza-Torres, C., & Hormazabal, E. (2019). Herramientas computacionales para la determinación del factor de seguridad y posición de la superficie de falla crítca circular para taludes en terreno seco Morh-Coulomb. Geotechnical engineering in the XXI Century: lessons learned and future challenges, 2706-2727. https://doi.org/10.3233/STAL190340.
- Ccahuana Pucllas, S. Y., & Sánchez Castro, J. R. (2019). Análisis de estabilidad de talud mediante métodos de equilibrio límite para la carretera Huancavelica-Lircay entre las progresivas del km 02+700 al km 02+800 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. Obtenido de http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/2881.
- Chen, F. Y., Liu, H.I., Meng, F. S., & Zhang, W. G. (2021). Effects of spactial variability of weak layer and seismic randomness on rock slope stability and reliability analysis. Soil dynamics and earthquake engineering, 146, ISSN 0267-7261. https://doi.org/10.1016/.soildyn.2021.106735.
- Comunidad Andina [CAN]. (2008). Pérdidas por desastres en Perú entre 1970 2006 [archivo PDF]. Recuperado el 19 de septiembre de 2021, de CAN: https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&url=http://www.comunidadan dina.org/predecan/doc/r2/osso/Cons025-2006-CorporacionOSSO-Articulo-Peru.pdf&ved=2ahUKEwjiy82U-YvzAhVDJrkGHaleDzcQFnoECBQQAQ&usg=AOvVaw0yRQ99tKgdqNr_851S4sw z.
- Coulomb, C. A. (1776). Essai sur une application des regles de maximums et minimis á quelques problèmes de statique, relatifs á l'architecture. *Memoires de mathematique et de physique*, (3), 38.
- Das, B. M. (2010). Principles of geotechnical engineering, 7a ed. USA: Cengaje Learning.
- Das, B. M. (2015). Fundamentos de ingeniería geotécnica, 4ta ed. México: Cengaje Learning.
Decreto Supremo n° 038-2021-PCM. (27 de febrero de 2021). Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de Diario Oficial El Peruano: https://elperuano.pe/NormasElperuano/2021/03/01/1931250-1/1931250-1.htm.

Duchaufour, P. (1960). Précis de pédologie. París: Masson et Cie.

- Duncan, J. M. (2000). Factors of safety and reliability in geotechnical engineering . *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 126(4), 307-316.
- El Comercio. (2017). *Costa Verde: problemas persisten a pocos días del verano*. Obtenido de https://elcomercio.pe/lima/obras/costa-verde-problemas-persisten-dias-verano-noticia-481563-noticia/?foto=1.
- El-Ramly, H. (2001). Probabilistic analyses of landslide hazards and risks: bridging theory and practice [Tesis de doctorado, University of Alberta]. Obtenido de https://doi.org/10.7939/R3GH9BK6F.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N. R., & Cruden, D. (2003). Reply to the discussion by J.M. Duncan, M. Navin, and T.F. Wolff on "Probabilistic slope stability analysis for practice". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp. 851-855.
- European Committee Standardization. (2007). Eurocode 7: Geotechnical design Part 2: ground investigation and testing. Obtenido de https://www.phd.eng.br/wpcontent/uploads/2015/02/en.1997.2.2007-1.pdf.
- Falamaki, A., Shafiee, A., & Shafiee, A. H. (2021). Under and post-construction probabilistic static and seismic slope stability analysis of Barmshour Landfill, Shiraz City, Iran. Bulletin of engineering geology and the environment, 80, 5451-5465. https://doi.org/10.1007/s10064-021-02277-4.
- Farias, M., & Assis, A. (1998). Uma comparação entre métodos probabilísticos aplicados à estabilidade de taludes. Anais do XI Congreso Brasilero de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica - COBRAMSEG, Brasilia, 1305-1313.
- Federal Highway Administration. (2011). LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations (FHWA-NHI-11-032). Obtenido de https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi11032/nhi11032.pdf.
- Fernández, W., Villalobos, S., & King, R. (2017). Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelos residuales de granito completamente descompuesto. *Revista ingeniería de construcción - RIC*, 33, 5-14. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000100005.

- Fredlund, D. (2007). Slope stability hazard management systems. Journal of Zhejiang University - Science A 8, 1695-1711. Obtenido de https://doi.org/10.1631/jzus.2007.A1695.
- Fredlund, D., Krahn, J., & Pufahl, D. (1981). The relationship between limit equilibrium slope stability methods. *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, volumen 3*, (págs. 409-416).
- Geoplaneta. (2022). ¿Qué es el cinturón de fuego del Pacífico? [figura]. Recuperado el 17 de abril de 2022, de Geoplaneta: https://www.geoplaneta.net/2022/03/cinturon-de-fuego-del-pacifico.html.
- Hallegate, S., Rentscheler, J., & Rozenberg, J. (2019). Lifelines: tomando acción hacia una infraestructura más resiliente. Sustainable infrastructure. Recuperado el 18 de septiembre de 2021, de World Bank: http:// openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31805.
- Hernández, G., & Torres, C. (2020). Análisis de confiabilidad de la propuesta de ingeniería de solución definitiva para la estabilización del talud de la vía evitamiento sector Zarumilla [Tesis de pregrado, Universidad Ricardo Palma]. Obtenido de http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/3562.
- Hidalgo Montoya, C. A., & Pacheco de Assis, A. (2011). Herramientas para análisis por confiabilidad en geotecnia: aplicación. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10 (18), 79-86. https://revistas.udem.edu.co/index.php/ingenierias/article/view/339.
- Huallpa Ayte, D. (2019). Identificación y evaluación de factores geotécnicos que causan la inestabilidad de la ladera en la quebrada de Qolcohuaycco, urbanización Santa Rosa, distrito de San Sebastián-Cuzco [Tesis de pregrado, Universidad Andina del Cusco]. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12557/3284.
- Instituto Geofísico del Perú [IGP]. (13 de julio de 2020). ¿Por qué y cómo estudiar los deslizamientos? Recuperado el 2 de octubre de 2021, de https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/206815-por-que-y-como-estudiar-los-deslizamientos.
- Instituto Geológico y Minero de España [IGME]. (1987). Manual de taludes.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (1995). *Geología del Perú, boletín INGEMMET. Serie A: carta geológica nacional [archivo PDF].* Recuperado el 19 de septiembre de 2021, de INGEMMET: http://hdl.handle.net/20.500.12544/176.
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (noviembre de 2009). Zonas críticas por peligros geológicos en la región Piura [archivo PDF]. Recuperado el 1 de octubre de 2021, de https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/1998.

- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET]. (octubre de 2018). Los peligros geológicos en el Perú [Archivo PDF]. Recuperado en septiembre de 2021 de INGEMMET: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/1114216/Peligros_Geologicos_en_Per u.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística e Información [INEI]. (agosto de 2018). *Censos Nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas.*
- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2014). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. *Resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos*, 200. Ginebra, Suiza: WMO.
- Jaime, A., & Montoya, A. (2008). Análisis de Confiabilidad en Geotecnia. *Memorias de la XXIV Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*. Aguascalientes, Ags., nov, 2008.
- Julca Lescano, C. V., Linares Quispe, R. F., & Quinteros Altamirano, E. (2021). Estabilización de los taludes de la Costa Verde empleando el método de la hidrosiembra en el tramo entre la calle Colón y la bajada malecón Balta del distrito de Miraflores [Tesis de pregrado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Obtenido de http://repositorio.usil.edu.pe/handle/USIL/11566.
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1998). Risk and reliability in geotechnical engineering. Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, 1172-1192.
- Lindsey, R. (15 de diciembre de 2016). *Extreme event attribution: the climate versus weather blame game*. Recuperado el 15 de septiembre de 2021, de Climate.gov: http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/extreme-event-attribution-climate-versus-weather-blame-game.
- Liu, Z.-Z., Li, W., & Yang, M. (2015). Two General Extension Algorithms of Latin Hypercube Sampling. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-9. 10.1155/2015/450492.
- Martins, J. L., Ferreira, M. L., Pardal, J. M., & Morano, C. A. (2012). Comparación de la estimación de la productividad del proceso de soldadura eléctrica por los métodos de simulación de Monte Carlo e Hipercubo Latino. *Información tecnológica*, 23(4), 21-32. Obtenido de https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000400004.
- Medina Zaldibar, Y. (2018). Uso del software Slide para el análisis del comportamiento sísmico de taludes. *CT y F Ciencia, tecnología y futuro*, 8, 1-17.
- Mendoza Loayza, J. A. (2017). Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Obtenido de http://hdl.handle.net/20.500.12404/7614.

- Mendoza, J. (2016). Estabilidad del talud María Reiche del acantilado Costa Verde, Lima -Perú. Obtenido de shorturl.at/qsBQ2
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (25 de octubre de 2021). *Estadística Infraestructura del transporte*. Obtenido de https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344790-estadistica-infraestructura-de-transportes-infraestructura-vial.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). Norma CE.020 Estabilización de suelos y taludes.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). Norma E.050 Suelos y cimentaciones. Obtenido de https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2686414/E.050%20Suelos%20y%20C imentaciones.pdf?v=1641411357.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). Norma E.030 Diseño sismorresistente. Obtenido de https://busquedas.elperuano.pe/download/url/anexo-de-rm-n-355-2018-vivienda-mediante-la-cual-se-modi-anexo-rm-n355-2018-vivienda-1720685-1.
- Ministerio del Ambiente. (2011). *Memoria descriptiva del mapa de vulnerabilidad física del Perú [archivo PDF]*. Recuperado el 21 de septiembre de 2021, de Centro de información del INDECI.
- Mohr, C. O. (1900). Welche umstände bedingen die elastizitätsgrenze und den bruch eines materials? Zeitschrift des vereines deutscher ingenieure, (44), 1524-1530, 1572-1577.
- Morgenstern, N. R. (1995). Managing risk in geotechnical engineering. *Proceedings of the 10th Pan American Conference on Soil Mechanics and Fundation Engineering*, Volume 4, in press.
- Morgenstern, N. U., & Price, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- Naval Facilities Engineering Command. (1986). *Soil Mechanics DESIGN MANUAL 7.01*. Obtenido de https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge441/DM7_02.pdf.
- Nguyen, T. S., & Likitlersuang, S. (2019). Reliability analysis o unsaturated soil slope stability under infiltration considering hydraulic and shear strenght parameters. *Bulletin og engineering geology and the environment*, 78, 5727-5743. https://doi.org/10.1007/s10064-019-01513-2.

- Ocando Sánchez, D. A. (2020). Análisis tridimensional de estabilidad de taludes y comparación con el análisis bidimensional [Tesis de postgrado, Universidad Nacional de Colombia]. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77750.
- OEA. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales. (1991). Desastres, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. Washington, D.C, U.S.
- OEA. Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente. Secretaría Ejecutiva para Asuntos Económicos y Sociales. (1993). Manual sobre el manejo de peligros naturales en la planificación para el desarrollo regional integrado. Washington, D.C, U.S. Recuperado el 14 de septiembre de 2021, de https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/begin.htm#Contents.
- Palisade. (2010). Guía para el uso de @Risk versión 5.7. New York: Palisade Corporation.
- Pérez Fajardo, J. S. (2018). Confiabilidad de taludes de suelo no saturado expuestos a precipitaciones pluviales [Tesis de doctorado, Universidad Autónoma del Estado de México]. Obtenido de http://hdl.handle.net/20.500.11799/95134.
- Phoon, K. K. (2008). *Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering: computations and application.* 1a ed. CRC Press.
- Phoon, K. K., & Ching, J. (2014). *Risk and reliability in geotechnical engineering*. 1a ed. CRC Press.
- Phoon, K. K., & Retief, J. V. (2016). Reliability of Geotechnical Structures in ISO2394. 1ra ed. London, UK: CRC Press.
- Pozo Seguil, C. V. (2021). Propuesta del sistema Vetiver como control de deslizamiento de suelos en la parte alta del A.A.H.H. La Florida, en la ciudad de Huánuco 2019 [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Obtenido de http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/2886.
- Prada, F., Ramos, A., Solaque, D., & Caicedo, B. (2011). Confiabilidad aplicada al diseño geotécnico de un muro de contención. *Obras y proyectos*, Volumen 9, pp. 49-58.
- Quispe Catunta, G. (2021). Determinación de estailidad física del talud en el frente minado del proyecto minero FADE I - Ananea [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/16597.
- Rabie, M. (2014). Comparison study between traditional and finite element methods for slopes under heavy rainfall. *HBRC Journal*, *10*(2), 160-168. https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2013.10.002.

- Ribeiro, R. C. (2008). Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas [Tesis de doctorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro]. Obtenido de https://doi.org/10.17771/PUCRio.acad.12963.
- Rocscience. (2013). *Slide version 6.0 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis*. Obtenido de www.rocscience.com.
- Rodríguez, D. (3 de septiembre de 2018). Los 10 peores desastres naturales en el Perú (de la historia). Recuperado el 20 de septiembre de 2021, de Lifeder: http://lifeder.com/desastres-naturales-peru.
- Rojas Urrutia, C. M. (2018). Comportamiento geotécnico de los taludes críticos de la carretera Lajas-El Tayal, provincia de Chota [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca]. Obtenido de http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/2069.
- Sackschewski Chapman, C. E. (2017). Soluciones para la estabilidad de taludes de la carretera Canta-Huayllay entre las progresivas del km 102 al km 110 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Obtenido de https://hdl.handle.net/20.500.12672/5743.
- Seiner, L. (2002). Estudios de historia medioambiental: Perú, siglos XVI-XX. Lima: Universidad de Lima.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces. *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- Steffen, O., Contreras, L., Terbrugge, P., & Venter, J. (2008). A Risk Evaluation Approach for Pit Slope Design. 42nd U.S. Rock Mechanics - 2nd U.S. Canada Rock Mechanics Symposium.
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos Volumen 1: analisis geotécnico, 1° ed. Bucaramanga, Colombia.
- Tang, W., Yucemen, M., & Ang, A. (1976). Probability-based short-term design of soil slope. Can Geotech Journal, 13:201-215, https://doi.org/10.1139/t76-024.
- Tavera, H. (2018). Perú, un país altamente sismico. Recuperado el 19 de septiembre de 2021, de Sociedad Geológica del Perú: https://www.sgp.org.pe/alerta-peru-un-paisaltamente-sismico/.
- Terzaghi, K. (1925). Theoretical soil mechanics. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc.

- The Economist. (29 de agosto de 2017). *Weather related disasters are increasing*. Recuperado el 14 de septiembre de 2021, de https://www.economist.com/graphic-detail/2017/08/29/weather-related-disasters-are-increasing.
- Travesedo, M. C. (20 de julio de 2017). Análisis Monte Carlo vs Hipercubo latino (I). Recuperado el 20 de octubre de 2022, de Artículo [página de LinkedIn]: https://www.linkedin.com/pulse/an%C3%A1lisis-monte-carlo-vs-hipercubo-latino-imario/.
- Turpo Phuño, J. I. (2018). Determinación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajo superficial del área de explotación en la unidad minera "Moisés Randy 2010" [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Moquegua].
- USACE. (1997). Introduction to probability and reliability methods for using in geotechnical engineering. U.S. Army Corps o Engineers, ETL 1110-2-547.

- USACE. (1999). Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies. U.S. Army Corps o Engineers, ETL 1110-2-556.
- Valiente, R., Sobrecases, S., & Díaz, A. (2015). Estabilidad de taludes: conceptos básicos, parámetros de diseño y métodos de cálculo. *CIVILIZATE n*° 7, 50-54.
- Wang, L., Hwan, J. H., Luo, Z., Juang, C. H., & Xiao, J. (2013). Probabilistic back analysis of slope failure - A case study in Taiwan. *Computers and geotechnics*, 51, 12-23.
- World Economic Forum [WEF]. (2018). The Global Risk Report 2018, 13th edition. Ginebra, Suiza.
- World Meteorological Organization [WMO]. (2021). The atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2019). Ginebra, Suiza.
- World Wildlife Fund. (2017). *Cuando la infraestructura perjudica a la naturaleza y a la gente*. Recuperado http://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/cuando-lainfraestructura-perjudica-a-la-naturaleza-y-a-la-gente.

Apéndices



Apéndice A análisis estáticos, taludes sintéticos (Slide - LHS)



Figura A1. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)



Figura A2. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A3. Caso 1A, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer).





Figura A5. Caso 1B, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A6. Caso 1B, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price).











Figura A9. Caso 1C, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A11. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A12. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price).





Figura A14. Caso 2A, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A15. Caso 2A, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A17. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A18. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A20. Caso 2B, máxima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A21. Caso 2C, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A23. Caso 2C, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A24. Caso 2C, máxima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A26. Caso 3A, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A27. Caso 3A, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A29. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A30. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A32. Caso 3B, máxima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura A33. Caso 3C, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A35. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)





Figura A36. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)

Apéndice B análisis pseudoestáticos, taludes sintéticos (Slide - LHS)



Figura B1. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)









Figura B3. Caso 1A, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B5. Caso 1B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B6. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B8. Caso 1B, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B9. Caso 1C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B11. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B12. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B14. Caso 2A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B15. Caso 2A, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer).





Figura B17. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B18. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B20. Caso 2B, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B21. Caso 2C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)

Figura B22. Caso 2C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)



Figura B23. Caso 2C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B24. Caso 2C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B26. Caso 3A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B27. Caso 3A, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B29. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B30. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B32. Caso 3B, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura B33. Caso 3C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)

Figura B34. Caso 3C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)



Figura B35. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)





Figura B36. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)

Apéndice C análisis estáticos, taludes sintéticos (Excel - FOSM)

Figura C1. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-PriceCOVmínimoFS inicial2.363

	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
CASO 1A	c'	18.00	1.800	19.80	2.449	0.08600	0.04778	0.00228	12.615	0.02880	84.60%
	φ'	30.00	3.000	33.00	2.551	0.18800	0.06267	0.00393	1.1994	0.00471	13.84%
	γ'	18.00	1.800	19.80	2.285	-0.07800	-0.04333	0.00188	0.2838	0.00053	1.57%
				,	Varianza del	[$\sigma(FS)$] ² =	0.034			
(H=10, 1=0.5)			Des	sviación e	estándar del		$\sigma(FS) =$	0.184			
					Índ	fiabilidad		β=	7.388		
					P		Pr=	0.000%			

Figura C2. Caso 1A, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

						()					
				Morgens	stern-Price						
				COV	máximo						
				FS inicial	2.363						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	2.449	0.08600	0.04778	0.00228	35.042	0.07999	67.29%
	φ'	30.00	3.000	33.00	2.551	0.18800	0.06267	0.00393	8.9371	0.03510	29.52%
CASO 1A	γ'	18.00	1.800	19.80	2.285	-0.07800	-0.04333	0.00188	2.0185	0.00379	3.19%
(H-10 T-0 E)				V	'arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.119	
(H-10, 1-0.5)			De	sviación e		$\sigma(FS) =$	0.345				
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	3.953	
					Р	robabilida	ad de falla		Pr=	0.015%	
		7		1			-				

Figura C3. Caso 1B, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price

				COV	mínimo						
				FS inicial	1.602						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.674	0.07200	0.04000	0.00160	12.615	0.02018	92.08%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.709	0.10700	0.03567	0.00127	1.1994	0.00153	6.96%
CASO 1P	γ'	18.00	1.800	19.80	1.553	-0.04900	-0.02722	0.00074	0.2838	0.00021	0.96%
(H=10 T=1 0)				١	/arianza del	factor de s	seguridad	[σ(FS)] ² =	0.022	
(11-10, 1-1.0)			De	esviación e	stándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.148	
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	4.066	
					F	robabilida	d de falla		Pr=	0.002%	

Figura C4. Caso 1B, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV	tern-Price máximo						
				FS inicial	1.602						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.674	0.07200	0.04000	0.00160	35.042	0.05607	79.64%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.709	0.10700	0.03567	0.00127	8.9371	0.01137	16.15%
CASO 1P	γ'	18.00	1.800	19.80	1.533	-0.06900	-0.03833	0.00147	2.0185	0.00297	4.21%
(H=10 T=1 0)				V	arianza del		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.070			
(H=10, T=1.0)			De	sviación es	stándar del		$\sigma(FS) =$	0.265			
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	2.269	
					Р	robabilida	id de falla		Pr=	1.160%	

Figura	C5. Caso 10	C, mínima	incertidumbre,	condición	estática	(FOSM,	Morgenstern-Price)
		-,				(,		

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 1.192						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.260	0.06800	0.03778	0.00143	12.615	0.01800	95.05%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.263	0.07100	0.02367	0.00056	1.1994	0.00067	3.55%
CASO 1C	γ'	18.00	1.800	19.80	1.137	-0.05500	-0.03056	0.00093	0.2838	0.00027	1.40%
(H-10 T-2 0)		Varianza del factor de segurio								0.019	
(H-10, 1-2.0)			De	esviación e	stándar del		$\sigma(FS) =$	0.138			
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	1.395	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	8.399%	

Figura C6. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price).



Figura C7. Caso 2A, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)



	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
CASO 2A	c'	18.00	1.800	19.80	1.947	0.05500	0.03056	0.00093	12.615	0.01178	73.27%
	φ'	30.00	3.000	33.00	2.068	0.17600	0.05867	0.00344	1.1994	0.00413	25.68%
	γ'	18.00	1.800	19.80	1.848	-0.04400	-0.02444	0.00060	0.2838	0.00017	1.06%
					Varianza de]	$\sigma(FS)]^2 =$	0.016			
(H=20, 1=0.5)			De	sviación	estándar del		$\sigma(FS) =$	0.127			
					Ínc		β=	7.035			
					I	Probabilida	id de falla		Pr=	0.000%	
					R	5 7	-				

Figura C8. Caso 2A, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens	stern-Price						
				COV	máximo						
				FS inicial	1.892						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.947	0.05500	0.03056	0.00093	35.042	0.03272	50.58%
	φ'	30.00	3.000	33.00	2.068	0.17600	0.05867	0.00344	8.9371	0.03076	47.55%
CASO 24	γ'	18.00	1.800	19.80	1.848	-0.04400	-0.02444	0.00060	2.0185	0.00121	1.86%
(H-20 T-0 5)				V	arianza del		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.065			
(11-20, 1-0.5)			De	sviación es	stándar del		$\sigma(FS) =$	0.254			
					Índ		β=	3.507			
					P	robabilida	id de falla		Pr=	0.069%	
Figura C9. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV	stern-Price mínimo						
				FS inicial	1.21						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.254	0.04400	0.02444	0.00060	12.615	0.00754	84.81%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.305	0.09500	0.03167	0.00100	1.1994	0.00120	13.53%
CASO 2R	γ'	18.00	1.800	19.80	1.169	-0.04100	-0.02278	0.00052	0.2838	0.00015	1.66%
(H-20 T-1 0)				١	Varianza del	factor de	factor de seguridad $[\sigma(FS)]^2$			0.009	
(H=20, 1=1.0)			De	esviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.094	
					Índ	fiabilidad		β=	2.227		
					F	Probabilida	d de falla		Pr=	1.307%	

Figura C10. Caso 2B, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)



Figura C11. Caso 2C, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)



	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	с'	18.00	1.800	19.80	0.886	0.03600	0.02000	0.00040	12.615	0.00505	90.18%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.908	0.05800	0.01933	0.00037	1.1994	0.00045	8.01%
CASO 26	γ'	18.00	1.800	19.80	0.816	-0.03400	-0.01889	0.00036	0.2838	0.00010	1.81%
(H=20 T=2 0)				Ň	Varianza del	factor de	seguridad]	$\sigma(FS)$] ² =	0.006	
(H=20, 1=2.0)	Desviación estándar del factor de seguridad $\sigma(FS) = 0.0$										
					Ínc	lice de con	fiabilidad		β=	-2.005	
					F	Probabilida	nd de falla		Pr=	100.000%	
					R		-1				

Figura C12. Caso 2C, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens	tern-Price						
				COV	máximo						
				FS inicial	0.85						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.886	0.03600	0.02000	0.00040	35.042	0.01402	77.54%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.908	0.05800	0.01933	0.00037	8.9371	0.00334	18.48%
CASO 2C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.816	-0.03400	-0.01889	0.00036	2.0185	0.00072	3.98%
(H-20 T-2 0)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.018	
(11-20, 1-2.0)			De	sviación e		$\sigma(FS) =$	0.134				
					Índ	fiabilidad		β=	-1.116		
					P	robabilida	id de falla		Pr=	100.000%	

lorgenstern-Pi

Figura C13. Caso 3A, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 1.712							
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)	
	c'	18.00	1.800	19.80	1.751	0.03900	0.02167	0.00047	12.615	0.00592	61.08%	
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.878	0.16600	0.05533	0.00306	1.1994	0.00367	37.87%	
CASO 2A	γ'	18.00	1.800	19.80	1.678	-0.03400	-0.01889	0.00036	0.2838	0.00010	1.04%	
(H-20 T-0 E)				١	/arianza del	factor de	actor de seguridad $[\sigma(FS)]^2$ =			0.010		
(H=30, 1=0.5)			0.098									
	Índice de confiabilidad β = 7.231											
					P	Probabilida	id de falla		Pr=	0.000%		

Figura C14. Caso 3A, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)



Figura C15. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)



	Parámet	ros Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.085	0.02900	0.01611	0.00026	12.615	0.00327	73.56%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.147	0.09100	0.03033	0.00092	1.1994	0.00110	24.79%
CACO 30	γ'	18.00	1.800	19.80	1.027	-0.02900	-0.01611	0.00026	0.2838	0.00007	1.66%
(U=20, T=1, 0)				,	Varianza del	factor de	seguridad]	$\sigma(FS)$] ² =	0.004	
(H=50, 1=1.0)	Desviación estándar del factor de seguridad $\sigma(FS)$ =										
					Ínc	lice de con	fiabilidad		β=	0.839	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	20.247%	
					R						

Figura C16. Caso 3B, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens	tern-Price						
				COV	máximo						
				FS inicial	1.056						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.085	0.02900	0.01611	0.00026	35.042	0.00910	50.98%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.147	0.09100	0.03033	0.00092	8.9371	0.00822	46.09%
CASO 2B	γ'	18.00	1.800	19.80	1.027	-0.02900	-0.01611	0.00026	2.0185	0.00052	2.94%
(H-30 T-1 0)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.018	
(11-30, 1-1.0)			De	sviación e	$\sigma(FS) =$	0.134					
					Índ	fiabilidad		β=	0.419		
					P	robabilida	id de falla		Pr=	35.217%	

Figura C17. Caso 3C, mínima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 0.721						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.747	0.02600	0.01444	0.00021	12.615	0.00263	84.89%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.777	0.05600	0.01867	0.00035	1.1994	0.00042	13.48%
CASO 3C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.697	-0.02400	-0.01333	0.00018	0.2838	0.00005	1.63%
(H-30 T-2 0)				١	/arianza del	factor de seguridad [$\sigma(FS)$]			σ(FS)] ² =	0.003	
(11-30, 1-2.0)			De	esviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.056	
					Índ		β=	-5.011			
					F	Probabilida	d de falla		Pr=	100.000%	

Figura C18. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición estática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price

FS inicial 0.721

	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)			
	c'	18.00	1.800	19.80	0.747	0.02600	0.01444	0.00021	35.042	0.00731	67.80%			
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.777	0.05600	0.01867	0.00035	8.9371	0.00311	28.88%			
CASO 3C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.697	-0.02400	-0.01333	0.00018	2.0185	0.00036	3.33%			
(H=30 T=2 0)				V	/arianza del	l factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.011				
(11=30, 1=2.0)			Des	viación e	stándar del	l factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.104				
					Ínc	lice de cor	ifiabilidad		β=	-2.687				
		_			F	Probabilida	ad de falla		Pr=	100.000%				
					000	K-								
	7													
		L												
	$5 \Delta \Delta \Delta Z$													
						123								
			\bigcirc		1	XX								
					0			1						
						V	/							
							0							
						/								
					R	G V								
					_ //	G	\bigcirc							

Apéndice D análisis pseudoestáticos, taludes sintéticos (Excel - FOSM)

Figura D1. Caso 1A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)





Morgenstern-Price

				COV	maximo						
				FS inicial	1.483						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.538	0.05500	0.03056	0.00093	35.042	0.03272	69.63%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.595	0.11200	0.03733	0.00139	8.9371	0.01246	26.51%
CASO 1A	γ'	18.00	1.800	19.80	1.429	-0.05400	-0.03000	0.00090	2.0185	0.00182	3.87%
(H-10 T-0 E)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.047	
(H-10, 1-0.3)			De	sviación e	stándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.217	
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	2.228	
					Р	robabilida	ad de falla		Pr=	1.304%	
		C					$-\Lambda$				

Figura D3. Caso 1B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 1.145						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	с'	18.00	1.800	19.80	1.201	0.05600	0.03111	0.00097	12.615	0.01221	91.87%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.225	0.08000	0.02667	0.00071	1.1994	0.00085	6.42%
CASO 1B	γ'	18.00	1.800	19.80	1.094	-0.05100	-0.02833	0.00080	0.2838	0.00023	1.71%
(H=10 T=1 0)				١	Varianza del	factor de s	seguridad	ſ	σ(FS)] ² =	0.013	
(11-10, 1-1.0)			De	esviación e	estándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.115	
					Índ	fiabilidad		β=	1.258		
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	10.643%	

Figura D4. Caso 1B, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price

				COV	máximo						
				FS inicial	1.145						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.201	0.05600	0.03111	0.00097	35.042	0.03392	80.96%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.225	0.08000	0.02667	0.00071	8.9371	0.00636	15.17%
CASO 1B	γ'	18.00	1.800	19.80	1.094	-0.05100	-0.02833	0.00080	2.0185	0.00162	3.87%
(H-10 T-1 0)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.042	
(H=10, 1=1.0)			De	sviación e	stándar del		$\sigma(FS) =$	0.205			
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	0.708	
					Р	robabilida	ad de falla		Pr=	24.266%	

Figura D5. Caso 1C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV	stern-Price mínimo						
[]	Parámetros	Xi	AXi	Ki+A	0.909 F(Xi+AXi)	٨f	δf/δXi	(δf/δXi) ²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.983	0.07400	0.04111	0.00169	12.615	0.02132	98.32%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.954	0.04500	0.01500	0.00022	1.1994	0.00027	1.24%
CASO 10	γ'	18.00	1.800	19.80	0.876	-0.03300	-0.01833	0.00034	0.2838	0.00010	0.44%
(H-10 T-2 0)				١	/arianza del	factor de seguridad			$\sigma(FS)]^2 =$	0.022	
(H-10, 1-2.0)			De	esviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.147	
					Índ	fiabilidad		β=	-0.618		
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	100.000%	

Figura D6. Caso 1C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)



Figura D7. Caso 2A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)



	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.211	0.03200	0.01778	0.00032	12.615	0.00399	72.33%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.283	0.10400	0.03467	0.00120	1.1994	0.00144	26.15%
CASO 34	γ'	18.00	1.800	19.80	1.148	-0.03100	-0.01722	0.00030	0.2838	0.00008	1.53%
(H-20 T-0 E)				Ň	Varianza de	factor de	seguridad	[$\sigma(FS)$] ² =	0.006	
(11-20, 1=0.5)			De	sviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.074	
					Ínc	lice de con	fiabilidad		β=	2.411	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	0.749%	
					R	57	-				

Figura D8. Caso 2A, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens	tern-Price						
				COV	máximo						
				FS inicial	1.179						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	1.211	0.03200	0.01778	0.00032	35.042	0.01108	49.41%
	φ'	30.00	3.000	33.00	1.283	0.10400	0.03467	0.00120	8.9371	0.01074	47.92%
CASO 24	γ'	18.00	1.800	19.80	1.148	-0.03100	-0.01722	0.00030	2.0185	0.00060	2.67%
(H-20 T-0 5)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.022	
(11=20, 1=0.3)			De	sviación e	stándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.150	
					Índ	ice de con	fiabilidad		β=	1.196	
					P	robabilida	id de falla		Pr=	11.792%	

Figura D9. Caso 2B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV	stern-Price mínimo						
				FS inicial	0.849						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.881	0.03200	0.01778	0.00032	12.615	0.00399	86.35%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.913	0.06400	0.02133	0.00046	1.1994	0.00055	11.82%
CASO 2B	γ'	18.00	1.800	19.80	0.818	-0.03100	-0.01722	0.00030	0.2838	0.00008	1.82%
(H-20 T-1 0)				١	/arianza del	factor de	seguridad	[σ(FS)] ² =	0.005	
(11-20, 1-1.0)			De	esviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.068	
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	-2.222	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	100.000%	

Figura D10. Caso 2B, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)



Figura D11. Caso 2C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price										
COV	mínimo									
FS inicial	0.629									

		Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	_	c'	18.00	1.800	19.80	0.664	0.03500	0.01944	0.00038	12.615	0.00477	93.59%
		φ'	30.00	3.000	33.00	0.673	0.04400	0.01467	0.00022	1.1994	0.00026	5.06%
CASO 26	_	γ'	18.00	1.800	19.80	0.601	-0.02800	-0.01556	0.00024	0.2838	0.00007	1.35%
(H=20, T=2, 0)	_					Varianza del	factor de s	seguridad]	$\sigma(FS)$] ² =	0.005	
(1-20, 1-2.0)		Desviación estándar del factor de seguridad $\sigma(FS) = 0.071$										
						Índ	ice de con	fiabilidad		β=	-5.197	
	_					F	robabilida	d de falla		Pr=	100.000%	
						R		7				



				Morgens COV	tern-Price máximo						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Yi+∆	0.629 F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.664	0.03500	0.01944	0.00038	35.042	0.01325	84.60%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.673	0.04400	0.01467	0.00022	8.9371	0.00192	12.28%
CASO 2C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.601	-0.02800	-0.01556	0.00024	2.0185	0.00049	3.12%
(H-20 T-2 0)				V	arianza del	factor de s	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.016	
(11-20, 1-2.0)			De	sviación e	stándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.125	
					Índ P	ice de con robabilida	fiabilidad d de falla		β= Pr=	-2.965 100.000%	

Figura D13. Caso 3A, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 1.06						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	с'	18.00	1.800	19.80	1.086	0.02600	0.01444	0.00021	12.615	0.00263	65.25%
	φ '	30.00	3.000	33.00	1.161	0.10100	0.03367	0.00113	1.1994	0.00136	33.70%
CASO 2A	γ'	18.00	1.800	19.80	1.038	-0.02200	-0.01222	0.00015	0.2838	0.00004	1.05%
(H-20 T-0 E)				١	/arianza del	factor de	seguridad]	$\sigma(FS)]^2 =$	0.004	
(H=30, 1=0.5)			De	esviación e	estándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.064	
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	0.945	
					F	Probabilida	d de falla		Pr=	17.389%	

Figura D14. Caso 3A, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)



Figura D15. Caso 3B, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price											
COV	mínimo										
FS inicial	0.737										

	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	с'	18.00	1.800	19.80	0.759	0.02200	0.01222	0.00015	12.615	0.00188	78.30%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.797	0.06000	0.02000	0.00040	1.1994	0.00048	19.93%
CASO 30	γ'	18.00	1.800	19.80	0.715	-0.02200	-0.01222	0.00015	0.2838	0.00004	1.76%
(H=30 T=1 0)				Ň	Varianza del	factor de s	seguridad]	$\sigma(FS)$] ² =	0.002	
(======================================			Des	sviación e	estándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.049	
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	-5.361	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	100.000%	
					R		-7				



				Morgens COV	tern-Price máximo						
	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	6.757 F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi)²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.759	0.02200	0.01222	0.00015	35.042	0.00523	57.45%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.797	0.06000	0.02000	0.00040	8.9371	0.00357	39.24%
CASO 2B	γ'	18.00	1.800	19.80	0.715	-0.02200	-0.01222	0.00015	2.0185	0.00030	3.31%
(H=30 T=1 0)				V	arianza del	factor de	seguridad		$[\sigma(FS)]^2 =$	0.009	
(11-30, 1-1.0)			De	sviación e	stándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.095	
					Índ P	ice de con robabilida	fiabilidad Id de falla		β= Pr=	-2.755 100.000%	

Figura D17. Caso 3C, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

				Morgens COV FS inicial	stern-Price mínimo 0.525						
	Parámetros	Xi	∆Xi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	∆f	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	V(Xi).(δf/δXi) ²	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.547	0.02200	0.01222	0.00015	12.615	0.00188	88.64%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.565	0.04000	0.01333	0.00018	1.1994	0.00021	10.03%
CASO 3C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.507	-0.01800	-0.01000	0.00010	0.2838	0.00003	1.34%
(H-30 T-2 0)				١	/arianza del	factor de	seguridad]	σ(FS)] ² =	0.002	
(11-30, 1-2.0)			De	esviación e	estándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.046	
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	-10.302	
					F	Probabilida	id de falla		Pr=	100.000%	

Figura D18. Caso 3C, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price COV máximo

FS inicial 0.525

	Parámetros	Xi	ΔXi	Xi+∆	F(Xi+∆Xi)	Δf	δf/δXi	(δf/δXi)²	V(Xi)	$V(Xi).(\delta f/\delta Xi)^2$	Contribución (%)
	c'	18.00	1.800	19.80	0.547	0.02200	0.01222	0.00015	35.042	0.00523	74.51%
	φ'	30.00	3.000	33.00	0.565	0.04000	0.01333	0.00018	8.9371	0.00159	22.62%
CASO 3C	γ'	18.00	1.800	19.80	0.507	-0.01800	-0.01000	0.00010	2.0185	0.00020	2.87%
(H=30 T=2 0)		0.007									
(11=30, 1=2.0)			Desv	/iación e	stándar del	factor de	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.084	
					Índ	lice de con	fiabilidad		β=	-5.667	
		-			F	Probabilida	ad de falla		Pr=	100.000%	
					200	G					
								Δ	70		
						U					
		-	>								
				-	-						
								10			
					5	10					
						V		R			
								\cdot			
				\square							
			\langle				/ C				
					\mathcal{D}		J.	/			
					<u> </u>						

Apéndice E análisis estáticos, talud María Reiche (Slide - LHS)



Figura E1. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, condición estática (Spencer)



Figura E2. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, condición estática (Morgenstern-Price)





Figura E3. Talud María Reiche, máxima incertidumbre, condición estática (Spencer)







Apéndice F análisis pseudoestáticos, talud María Reiche (Slide - LHS)



Figura F1. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer).



Figura F2. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, condición pseudoestática (Morgenstern-Price)





Figura F3 Talud María Reiche, máxima incertidumbre, condición pseudoestática (Spencer)







Apéndice G análisis de talud María Reiche (Excel - FOSM)

Figura G1. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, estático (FOSM, Morgenstern-Price)

Morgenstern-Price



(estático)	Desviación estándar del factor de seguridad	$\sigma(FS) =$	0.425	
	Índice de confiabilidad	β=	1.292	
	Probabilidad de falla	Pr=	10.039%	

Figura G3. Talud María Reiche, mínima incertidumbre, pseudoestático (FOSM, Morgenstern-Price)

					Morgens	stern-Price						
					COV	mínimo						
					FS inicial	1.246						
1		Denémentare	V:	A 1/2	V :		4.6	S £ /S v:	(SE/SV:)2	\//\/:\	V/V:) (\$£/\$V:\2	
		Parametros	XI		XI+∆	$F(XI+\Delta XI)$	Δτ	01/071	(01/071)-	V(XI)	V(XI).(01/0XI)-	Contribución (%)
		с'	55.00	5.500	60.50	1.672	0.42600	0.07745	0.00600	117.784	0.70661	96.15%
		φ'	40.00	4.000	44.00	1.670	0.42400	0.10600	0.01124	2.0771	0.02334	3.18%
	TALUD MARÍA	γ'	21.00	2.100	23.10	1.483	0.23700	0.11286	0.01274	0.3864	0.00492	0.67%
	REICHE				١	/arianza del	factor de	seguridad]	$\sigma(FS)]^2 =$	0.735	
	(pseudoestático)			D	esviación e	estándar del	factor de s	seguridad		$\sigma(FS) =$	0.857	
						Índ	lice de con	fiabilidad		β=	0.287	
						P	robabilida	ad de falla		Pr=	41.292%	

Figura G4. Talud María Reiche, máxima incertidumbre, pseudoestático (FOSM, Morgenstern-Price)

FS inicial 1.246	
Parámetros Xi ΔXi Xi+Δ F(Xi+ΔXi) Δf δf/δXi (δf/δXi)² V(Xi) V(Xi).(δf/δXi)² Contribu	ción (%)
c' 55.00 5.500 60.50 1.672 0.42600 0.07745 0.00600 327.060 1.96210 90.	38%
φ' 40.00 4.000 44.00 1.670 0.42400 0.10600 0.01124 15.4774 0.17390 8.0	1%
TALUD MARÍA γ' 21.00 23.10 1.483 0.23700 0.11286 0.01274 2.7475 0.03499 1.6	1%
REICHE Varianza del factor de seguridad $[\sigma(FS)]^2 = 2.171$	
(pseudoestático) Desviación estándar del factor de seguridad $\sigma(FS) = 1.473$	
Índice de confiabilidad β = 0.167	
Probabilidad de falla Pr = 47.449%	

Morgenstern-Price

Anexos



Anexo A resumen de valores típicos de coeficientes de variación

Parámetro	Coeficiente de variación (%)	Fuente
Dess error/Con	3.00 - 7.00	(Ribeiro, 2008)
Peso específico	4.00 - 8.00	(USACE, 1999)
Peso unitario sumergido	0.00 - 10.0	(Duncan, 2000)
Cohesión	40 (20.0 - 80.0)	-
	2.00 - 13.0	-
Ángulo de fricción efectivo	3.70 – 9.30 (arenas)	(Ribeiro, 2008)
	7.50 – 10.1 (arcillas)	(USACE, 1999)
Deviatoria de devenita de constitue	13.0-40.0	(Riberiro, 2008;
Resistencia no drenada de arcillas	11.0 - 45.0	Duncan, 2000)
Coeficiente de permeabilidad (k)	20.0 - 90.0	(USACE, 1999)
Coeficiente de consolidación (Cv)	33.0 - 68.0	(Duncan, 2000)
Presión de consolidación (Pp)	10.0 - 35.0	(Duncan, 2000)
Índice de compresión (Cc)	10.0 - 37.0	(Duncan, 2000)
Número de golpes SPT (N)	15.0 - 45.0	(Ribeiro, 2008)
Nota: elaborado a partir de fuentes señala	das	

RENS.

Tabla A1. Valores típicos de coeficientes de variación

Anexo B fórmulas para cálculo de coeficiente sísmico

Coeficiente	Observación	Fuente		
Kh = 0.10, Kh = 0.20	Sismos severos y destructivos	Terzaghi (1950)		
Kh = 0.50	Sismos catastróficos			
$Kh = a_{m\acute{a}x}/g$	Si: $a_{máx} \leq 2.0 \text{ m/s}^2$	N. 1		
$Kh = 0.33*(a_{máx}/g)^{0.33}$	Si: $a_{max} > 2.0 \text{ m/s}^2$	Noda y Uwave (1976)		
	, S°SX,			
$Kh = 0.10, F_{sismico} \! \geq \! 1.50$	Sismos de magnitud de 6.5	Seed (1979)		
$Kh = 0.15, F_{sismico} \ge 1.15$	Sismos de magnitud de 8.5	Seed (1980)		
	Care and Car	79		
$Kh = [0.33 - 0.50]* a_{max}/g$	Considera amplificación	Marcuson (1981)		
\supset	$\Delta \perp \Delta$	\geq		
$Kh = 0.65*a_{máx}/g$	Sismo de magnitud intermedia	Krinitzsk (1993), Taniguchi V Sasaki (1986)		
		(1, 00)		
$Kh = 0.50*a_{máx}/g$	Para presas, FS = 1	Hynes-Griffin y Franklin		
č	REN	(1984)		
$Kh=0.30^{\ast}a_{m\acute{a}x}/g$	Si: $a_{máx} \le 6.6 \text{ m/s}^2$	Samaani (1002)		
$Kh = 0.22*(a_{máx}/g)^{0.33}$	Si: $a_{max} > 6.6 \text{ m/s}^2$	Saragolli (1995)		

Tabla B1. Estimación del coeficiente sísmico

Nota: elaborado a partir de fuentes señaladas