

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



Tesis

**Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la
incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca, Abancay–**

2024

Asesor:

Msc. Maldonado Mendivil, Ángel

Autor:

Cuellar Morales, Cristian Abner

Para optar el Título Profesional de: Ingeniero Civil

Abancay - Apurímac - Perú

2025



Universidad Tecnológica de los Andes

Transformando vidas
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

Acta N°: 041

En la ciudad de Abancay, a los 12 días del mes de febrero del 2025, siendo las 9:00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0120-2025- EPIC-FI-UTEA-SA de fecha 03 de febrero del 2025, de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería:

Presidente :	Dra. Vera Teves, Rosa Marina
Dictaminante :	Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex
Replicante :	Ing. Gamarra Mota, Rubén

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

Tesis Trabajo de suficiencia profesional

Titulada:

Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca , Abancay - 2024

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br: Cuellar Morales, Cristian Abner

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Civil

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

Por: Unanimidad
(Unanimidad o Mayoría) (*)

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller (Apellidos y Nombres)	Calificación (**)
Cuellar Morales, Cristian Abner	Aprobado

Siendo las 10:30am horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

Presidente: Dra. Vera Teves, Rosa Marina

(.....)

Dictaminante: Ph. D. Vasquez Ramirez, Abbon Alex

(.....)

Replicante: Ing. Gamarra Mota, Rubén

(.....)

Abancay 10 de julio del 2025

Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca, Abancay-2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%	20%	4%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	6%
2	Submitted to Universidad Tecnologica de los Andes Trabajo del estudiante	3%
3	www.coursehero.com Fuente de Internet	1%
4	repositorio.utea.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	qdoc.tips Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.autonomadeica.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	dokumen.pub Fuente de Internet	<1%

Metadatos

Datos del Autor	
Apellidos y nombres	: Cuellar Morales, Cristian Abner
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 73142790
URL ORCID	: https://orcid.org/0009-0008-2432-150X
Datos del Asesor	
Apellidos y nombres	: Msc. Maldonado Mendivil, Ángel
Tipo de Documento de Identidad	: DNI
Numero de Documento de Identidad	: 06788424
URL ORCID	: https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de investigación	
Facultad	: Ingeniería
Escuela Profesional	: Ingeniería Civil
Línea de Investigación	: Gestión de la Infraestructura para el Desarrollo Sostenible
Rango de años en que se realizó la investigación	: 2024-2025
Fuente de financiamiento	: Propia
Porcentaje de similitud	: 20%
URL de OCDE	: https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria

A mi madre; Reina Morales Peralta, fuente inagotable de amor, fortaleza y sabiduría, quien con su ejemplo y sacrificio me ha enseñado el verdadero significado del esfuerzo y la perseverancia. Este logro no habría sido posible sin su sostén incondicional y sus palabras de apoyo en los momentos más complicados.

A mis hermanos; Yeison, Alex, Juan Carlos y Kevin Antonio, compañeros de vida y pilares fundamentales en mi camino, quienes siempre han estado a mi lado, brindándome ánimo y confianza para superar cada obstáculo. Su presencia y cariño han sido un motor constante para alcanzar mis metas.

Agradecimiento

Expreso mi más sincera gratitud a mi asesor, Msc. Maldonado Mendivil Ángel, cuyo conocimiento y guía fueron fundamentales para la elaboración de esta investigación.

Además, deseo extender mi gratitud a los magistrales de la Escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de los Andes, quienes a lo largo de mi formación compartieron sus valiosos conocimientos y experiencias.

Resumen

El objetivo general de la presente tesis es determinar el factor de seguridad media y la probabilidad de falla, y sus objetivos específicos son describir las características geométricas y analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud de la zona denominada Pucca Pucca de la ciudad de Abancay, Apurímac.

El tipo de investigación es aplicado debido a que se empleó el método de Spencer y la simulación Monte Carlo para determinar el factor de seguridad media y la probabilidad de falla del talud. Asimismo, el nivel de investigación es descriptivo debido a que se caracterizó la geometría y la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud.

Los resultados para las características geométricas quedo definido por las progresivas y elevación de la Tabla 04. Por otro lado, el resultado para la incertidumbre del peso específico fue una distribución normal cuya media es 17.96KN/m^3 y desviación estándar de 0.15KN/m^3 , el ángulo de fricción fue una distribución probabilística normal donde la media es 33.60° y una desviación estándar de 1.69° , mientras la cohesión presento una incertidumbre descrita por la distribución probabilística gamma de media de 34.42KN/m^2 y una desviación estándar de 3.45KN/m^2 .

En conclusión, aplicando el método Spencer y la Simulación Monte Carlo se obtuvo un factor de seguridad media de 1.096 (indica estabilidad) y una probabilidad de falla de 5.986% siendo estos significativos para la estabilidad del talud.

Palabras claves: Factor de seguridad, probabilidad, incertidumbre, parámetros geotécnicos, simulación Monte Carlo.

Abstract

The general objective of this thesis is to determine the average safety factor and the probability of failure, and its specific objectives are to describe the geometric characteristics and analyze the uncertainty of the geotechnical parameters of the slope of the area called Pucca Pucca in the city of Abancay, Apurímac.

The type of research is applied because Spencer's method and Monte Carlo simulation were used to determine the average safety factor and the probability of failure of the slope. Likewise, the level of investigation is descriptive because the geometry and uncertainty of the geotechnical parameters of the slope were characterized.

The results for the geometric characteristics were defined by the progressives and elevation of Table 04. On the other hand, the result for the uncertainty of the specific weight was a normal distribution whose mean is 17.96KN/m^3 and standard deviation of 0.15KN/m^3 , the friction angle was a normal probabilistic distribution where the mean is 33.60° and a standard deviation of 1.69° , while the cohesion presented an uncertainty described by the gamma probabilistic distribution with a mean of 34.42KN/m^2 and a standard deviation of 3.45KN/m^2 .

In conclusion, applying the Spencer method and Monte Carlo Simulation, an average safety factor of 1.096 (indicating stability) and a failure probability of 5.986% were obtained, these being significant for slope stability.

Keywords: Safety factor, probability, uncertainty, geotechnical parameters, Monte Carlo simulation.

Índice general

Portada	i
Acta de sustentación	ii
Reporte de similitud	iii
Metadatos	iv
Dedicatoria	v
Agradecimiento	vi
Resumen	vii
Abstract	viii
Índice general	ix
Índice de tablas	xii
Índice de figuras	xiii
Índice de anexos	xv
I. Introducción	16
II. Planteamiento del problema	18
2.1. Descripción y formulación del problema	18
2.2. Objetivos	19
2.2.1. Objetivo general	19
2.2.2. Objetivos específicos	19
2.3. Justificación e importancia	20
2.4. Hipótesis	20
2.4.1. Hipótesis general	20
2.4.2. Hipótesis específicas	20

2.5.	Variables	21
III.	Marco teórico.....	23
3.1.	Antecedentes	23
3.2.	Bases teóricas.....	26
3.2.1.	Probabilidad de un evento	26
3.2.2.	Probabilidad condicional.....	27
3.2.3.	Variable aleatoria y distribución probabilística.....	27
3.2.4.	Medidas de tendencia central y variabilidad.....	28
3.2.5.	Distribución de probabilidad continua	29
3.2.6.	Aspectos generales de taludes en suelos.....	35
3.2.7.	Método Spencer	38
3.2.8.	Simulación Monte Carlo.....	42
3.3.	Definición de términos.....	42
IV.	Metodología.....	44
4.1.	Tipo y nivel de la investigación	44
4.2.	Ámbito temporal y espacial.....	44
4.2.1.	Temporal.....	44
4.2.2.	Espacial.....	45
4.3.	Población y muestra.....	45
4.4.	Instrumentos	45
4.5.	Procedimientos.....	46
4.6.	Análisis de datos	48
4.7.	Consideraciones éticas	49

V. Resultados y discusiones	50
5.1. Describir las características geométricas del talud	50
5.2. Analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud.....	57
5.3. Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos	66
VI. Conclusiones	74
VII. Recomendaciones	75
VIII. Referencias	76
IX. Anexos	79

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Operacionalización de variables</i>	22
Tabla 2 <i>Técnica e instrumento de recolección de datos</i>	46
Tabla 3 <i>Progresivas y elevaciones del talud</i>	55
Tabla 4 <i>Coordenados transformadas de talud</i>	56
Tabla 5 <i>Peso específico de las diferentes muestras</i>	57
Tabla 6 <i>Tabla de frecuencia del peso específico</i>	58
Tabla 7 <i>Media y desviación estándar del peso específico</i>	59
Tabla 8 <i>Ángulo de fricción de las diferentes muestras</i>	60
Tabla 9 <i>Tabla de frecuencia del ángulo de fricción</i>	61
Tabla 10 <i>Media y desviación estándar del ángulo de fricción</i>	62
Tabla 11 <i>Cohesión de las diferentes muestras</i>	63
Tabla 12 <i>Tabla de frecuencia de la cohesión</i>	63
Tabla 13 <i>Media y desviación estándar de la cohesión</i>	65

Índice de figuras

Figura 1 <i>Distribución normal con una media de 5 y desviación estándar 2</i>	29
Figura 2 <i>Distribución uniforme de intervalos de 3 a 7</i>	30
Figura 3 <i>Distribución triangular</i>	31
Figura 4 <i>Ejemplos de distribución beta</i>	32
Figura 5 <i>Distribución exponencial para diferentes valores</i>	33
Figura 6 <i>Ejemplo de distribución logarítmica</i>	34
Figura 7 <i>Distribución gamma para diferentes valores</i>	35
Figura 8 <i>Falla de talud</i>	36
Figura 9 <i>Falla superficial</i>	37
Figura 10 <i>Falla por rotación (local y de base)</i>	37
Figura 11 <i>Dimensiones de la superficie de deslizamiento de un talud</i>	38
Figura 12 <i>Fuerzas actuantes en una rebanada del talud (método Spencer)</i>	39
Figura 13 <i>Análisis vectorial de las fuerzas que actúan en la rebanada</i>	40
Figura 14 <i>Flujograma del desarrollo de la tesis</i>	47
Figura 15 <i>Ubicación del proyecto</i>	50
Figura 16 <i>Ortofoto del talud</i>	51
Figura 17 <i>Modelo digital de elevaciones</i>	52
Figura 18 <i>Curvas de nivel y progresivas del talud</i>	53
Figura 19 <i>Corte de las progresivas del talud</i>	54
Figura 20 <i>Polígono de frecuencia e histograma del peso específico</i>	58
Figura 21 <i>Incertidumbre del peso específico</i>	60
Figura 22 <i>Histograma y polígono de frecuencia del ángulo de fricción</i>	61
Figura 23 <i>Incertidumbre del ángulo de fricción</i>	62
Figura 24 <i>Histograma y polígono de frecuencia de la cohesión</i>	64
Figura 25 <i>Incertidumbre de la cohesión</i>	65
Figura 26 <i>Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud</i>	66

Figura 27 <i>Histograma relativa del factor de seguridad por el método Spencer</i>	67
Figura 28 <i>Probabilidad de falla acumulada respecto al factor de seguridad por el método Spencer</i>	68
Figura 29 <i>Simulación Monte Carlo para la probabilidad de falla del talud</i>	69
Figura 30 <i>Simulación Monte Carlo para el factor de seguridad media del talud</i>	70
Figura 31 <i>Dispersión del peso específico vs factor de seguridad (Spencer)</i>	71
Figura 32 <i>Dispersión del ángulo de fricción vs factor de seguridad (Spencer)</i>	72
Figura 33 <i>Dispersión de la cohesión vs factor de seguridad (Spencer)</i>	73

Índice de anexos

Anexo 01. Matriz de consistencia.....	80
Anexo 02. Operacionalización de variables.....	82
Anexo 03. Estudio de mecánica de suelos.....	84
Anexo 05. Certificados de calibración de equipos	188

I. Introducción

La tesis, titulada “Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024”, tiene como objetivo general determinar el factor de seguridad media (FS) y la probabilidad de falla (%PF) del talud en dicha área. Para alcanzar este propósito, se plantearon los siguientes objetivos específicos, describir las características geométricas y analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud.

El enfoque de la investigación es de tipo aplicado, ya que se emplearon métodos avanzados como el método de Spencer y la simulación de Monte Carlo para solucionar el problema general.

El nivel de investigación es descriptivo y aplicativo. Descriptivo porque se caracterizó la forma espacial del talud y la incertidumbre en las características geotécnicas. Es aplicativo porque se utilizó el método Spencer y la simulación Monte Carlo para calcular el factor de seguridad media y la probabilidad de falla del talud.

Para describir las características geométricas del talud, se perpetró un levantamiento topográfico en la zona en cuestión, generando un conjunto de puntos que permitieron construir el perfil del talud y establecer su geometría.

Para analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos se llevó a cabo ensayos de suelos para determinar el ángulo de fricción, cohesión y peso específico. Posteriormente, se analizó el comportamiento probabilístico de estas propiedades, obteniendo para el peso específico y ángulo de fricción una distribución normal, y la cohesión una distribución gamma.

Este análisis permitió incorporar la incertidumbre inherente a los parámetros geotécnicos en el modelo (método Spencer y simulación Monte Carlo), asegurando un enfoque más realista para evaluar la estabilidad.

Para evidenciar el factor de seguridad media y posibilidad de falla, una vez definidos las características geométricas y las funciones probabilísticas de los parámetros

geotécnicos, se generaron datos aleatorios. Aplicando el método Spencer y la simulación Monte Carlo, con los datos aleatorios, se evaluó el comportamiento del talud ante las condiciones de incertidumbre. Como resultado, se calculó el factor de seguridad media de 1.096 y la probabilidad de falla del talud de 5.986%, permitiendo así una evaluación precisa de su estabilidad.

La tesis combina herramientas modernas de análisis geotécnicas con un enfoque probabilístico para abordar la complejidad de los taludes en zonas con alta incertidumbre en sus parámetros. Los resultados obtenidos serán de gran utilidad para el diseño, monitoreo y manejo de riesgos asociados a taludes en condiciones similares, contribuyendo a la seguridad y sostenibilidad de proyectos de infraestructura en la ciudad de Abancay.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

Los taludes son estructuras geotécnicas importantes en proyectos de ingeniería civil, construcción y minería. La estabilidad de un talud es fundamental para avalar la seguridad para las vidas humanas y la integridad de las construcciones cercanas. La probabilidad de falla de un talud es un aspecto crítico que debe evaluarse de manera precisa y confiable para tomar decisiones informadas en el diseño, construcción y mantenimiento de estos elementos.

En el Perú, desde el 2003 hasta el 2021, se presentaron 903 derrumbes de cerros y 3584 deslizamientos (fallas de taludes), llegando a afectar a más de 200,000.00 personas (INDECI, 2022). Para la ingeniería es un desafío poder predecir estos fenómenos, sin embargo, en la actualidad se presentan métodos que pueden ayudar a calcular la probabilidad de falla de los taludes, ayudando a la ingeniería a tomar decisiones y soluciones prácticas para controlar y/o mitigar estos peligros.

Producto de estos fenómenos, el departamento más perjudicado a nivel nacional es Apurímac, con 90 derrumbes de cerros y 238 deslizamientos afectando un poco más de 90 000.00 personas (INDECI, 2022). Es decir, que el 45% de personas damnificadas a nivel nacional, fruto de estos desastres naturales, pertenecen a Apurímac.

En la ciudad de Abancay, provincia de Abancay, departamento de Apurímac, se encuentra una zona denominada "Pucca Pucca", caracterizada por la presencia de un talud cuya estabilidad es motivo de preocupación. La ubicación del talud está enmarcada por las coordenadas UTM (Este: 728 396.700, Norte: 8 492 629.618) a una altitud de 2 544.00 msnm, tiene una altura de 21 metros y una pendiente de 69.70°. A nivel estructural, su inclinación pronunciada y su altura incrementan su vulnerabilidad a posibles fallas. Además, las condiciones geotécnicas indican una calidad de suelo deficiente (CONCHIPA, 2022), lo que agrava el riesgo para las construcciones cercanas, específicamente para un "almacén" que actualmente se encuentra en fase de construcción en la base de este talud.

El talud representa una amenaza significativa para el almacén y para las futuras actividades en la zona, dada la posibilidad de que el terreno no sea capaz de resistir adecuadamente las condiciones de carga y el entorno geológico. Es por lo que se plantea las siguientes interrogantes:

Problema general

¿Cómo determinar el factor de seguridad media y la probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024?

Problemas específicos:

- ¿Cómo describir las características geométricas del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024?
- ¿Cómo analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo general

Determinar el factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay – 2024.

2.2.2. Objetivos específicos

- Describir las características geométricas del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.
- Analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

2.3. Justificación e importancia

La tesis contribuye al avance del análisis para la evaluación de la estabilidad de taludes y brinda a los ingenieros una alternativa de análisis donde se considere la posibilidad de falla del talud debido a la incertidumbre en las particularidades geotécnicas.

Es ineludible realizar la tesis porque la estabilidad del talud afecta directamente a la seguridad de la infraestructura que se encuentra en el pie del mismo. La estimación del factor de seguridad media y el riesgo de falla del talud permite identificar y cuantificar los niveles de riesgo, lo cual es fundamental para planificar opciones de mitigación apropiadas y medidas de prevención de desastres que pueden resultar en pérdidas para las personas, la propiedad y la economía.

La realización de esta tesis también contribuye al avance tecnológico del conocimiento en el campo de la ciencia geotécnica, ya que el estudio de estabilidad y la consideración de las incertidumbres geotécnicas son aspectos clave en la prevención de fallas de taludes. Este problema se muestra fuertemente en el talud de la zona Pucca Pucca donde sus características como la pendiente pronunciada y la mala calidad del suelo requieren un enfoque cuidadoso basado en un análisis más profundo como es el riesgo de falla y su factor de seguridad media.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

El factor de seguridad media y la probabilidad de falla del talud son determinadas producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos en la zona Pucca Pucca, Abancay – 2024.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Las características geométricas son descritas por las progresivas y elevación del perfil del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

- La incertidumbre de los parámetros geotécnicos (peso específico, ángulo de fricción y cohesión) son analizados con la media, desviación estándar y función probabilística en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

2.5. Variables

Variable dependiente: Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

Variable independiente: Incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

Variable interviniente: Características geométricas del talud en la zona Pucca Pucca, Abancay - 2024.

A continuación, se presenta la tabla 1 de la operacionalización de variables:

Tabla 1
Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Índice	Instrumentos	Escala de medición
Variable dependiente <u>Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud</u>	El factor de seguridad de la falla del talud es la relación entre la resistencia media del suelo al corte (Braja, 2015); la probabilidad de falla del talud se define como la posibilidad de que ocurra un colapso del terreno (Vanmarcke, 1997).	Factor de seguridad media es el promedio de los factores de seguridad obtenida de toda la simulación producto de los valores aleatorios obtenidos de los parámetros geotécnicos producto de la incertidumbre de los mismos, en cambio de la probabilidad de falla es la cantidad de factores de seguridad menores a 1 entre el total de simulaciones.	Dimensión 1 Factor de seguridad Dimensión 2 Probabilidad	Indicador 1 Adimensional Indicador 2 Porcentaje	Indicador 1 Indicador 2 (%)	Ficha de recolección de datos.	Razón
Variable independiente <u>Incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud</u>	Son la incertidumbre de las características geotécnicas presentes en los diferentes estrados existente en el talud; estos son: ángulo de fricción, cohesión y peso específico (Cruz, 2012).	Es la variación de cada uno de los parámetros geotécnicos (ángulo de fricción, cohesión y peso específico) definidos por una función probabilística.	Dimensión 1 Ángulo de fricción Dimensión 2 Cohesión Dimensión 3 Peso específico	Indicador 1 Grados sexagesimales Indicador 2 Presión Indicador 3 peso específico	Indicador 1 (°) Indicador 2 (KPa) Indicador 3 (KN/m ³)	Ficha de recolección de datos de laboratorio.	Razón
Variable Interviniente <u>Características geométricas del talud.</u>	Se refieren a los aspectos dimensionales de la superficie inclinada (TWINKL, 2022).	Son las coordenadas obtenidas del levantamiento topográfico que describen el perfil del talud en progresivas y su elevación.	Dimensión 1 Progresiva Dimensión 2 Elevación	Indicador 1 Longitud Indicador 2 Longitud	Indicador 1 (m) Indicador 2 (m)	Ficha de recolección de datos.	Razón

Nota: Elaboración propia.

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes

Prado et al, (2020) en su tesis: “Análisis de estabilidad de talud de la carretera Nic.7 en el km 176, municipio de Santo Tomas, del departamento de Chontales”. Cuyo objetivo general fue analizar la estabilidad del talud de dicha región en la República de Nicaragua, con un enfoque de investigación mixto y según su naturaleza es descriptivo. La muestra fueron las características geotécnicas del mencionado lugar. Después de realizar el análisis correspondiente llegaron a la conclusión que el talud tiene un factor de seguridad (FS) de 0.5, siendo un talud totalmente inestable.

Fernandez (2018) en su tesis para obtener el título de Ingeniero cuyo nombre es: “Evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en suelo residual de roca granítica mediante la simulación de Monte Carlo”. Donde el objetivo general fue realizar una evaluación probabilística en el análisis de estabilidad de taludes en la Región de Biobío, a 8 km y 430 km de la ciudad de Concepción y Santiago, respectivamente, en la República de Chile. El nivel de la investigación fue descriptivo; considerando las muestras el material del suelo residual producto de la meteorización de la roca granítica, en la zona aludida. Al finalizar dicho trabajo se concluyó que al realizar el análisis de la falla del talud por métodos estadísticos llegan a ser más conservadores que al realizar por método deterministas y que es necesario tomar en consideración la variabilidad de los parámetros resistentes (cohesión, ángulo de fricción y peso específico).

Niño (2017) en su trabajo titulada: “Análisis Probabilístico para el Diseño de Taludes en Explotación Minera a Cielo Abierto” con el objetivo de aportar una metodología de análisis más realista que contenga la discontinuidad de un macizo rocoso e incertidumbre aleatoria de las características geotécnicas que implican los análisis probabilísticos realizando el caso de estudio en la mina El Pedregal, ubicada en Une Cundinamarca de la República de Colombia. Presento un nivel de investigación descriptiva y con un nivel de

diseño de investigación documental facilitada por la empresa minera; siendo las muestras las características técnicas del macizo rocoso. Concluyendo que la modelación numérica considerando la incertidumbre de los parámetros geológicos se puede determinar la probabilidad de falla del talud.

Durand y Arias (2022) en su tesis cuyo título es: "Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad de taludes en suelos arenosos del sector Lomo de Corvina-Villa el Salvador". El objetivo general fue obtener la probabilidad de falla y el factor de seguridad considerando los análisis probabilísticos y determinísticos, respectivamente del caso de estudio, taludes ubicados en el sector Lomo Corvina-Villa el Salvador, Lima - Perú. Realizó una investigación descriptiva, explicativa y correlacional, con un diseño de investigación experimental, longitudinal y retrospectivo. Tomo muestras de los puntos más críticos de la zona de estudio, utilizando como instrumentos la Norma E. 050 y el software Slide. Llegando a la conclusión de que en dicha zona el factor de seguridad es menor a 1, siendo el más crítico 0.392; demostrando una probabilidad de falla del 100% en todos los taludes estudiados.

Barboza y Zambrano (2021) cuya tesis titulada: "Análisis comparativo de la aplicación de los métodos Bishop Simplificado y Morgenstern-Price para la determinación de la estabilidad de taludes" con el objetivo general de analizar el factor de seguridad determinado por el método Bishop Simplificado y Morgenstern-Price del talud ubicado en la carretera Huancayo - Lircay. La metodología de la investigación fue con un enfoque cualitativo, tipo descriptiva y diseño no experimental. Concluyendo que en el análisis de la falla del talud por el método Bishop Simplificado y Morgenstern-Price en condiciones estáticas fue de 1.332 y 1.350, respectivamente; y cuando se analizó en condición pseudo estáticas se obtuvieron 0.937 y 0.972, respectivamente.

Altamirano y Gozzer (2021) en su tesis titulada: "Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad del talud de la subestación eléctrica Colcabamba", cuyo objetivo general de esta investigación fue realizar una comparación de los enfoques

probabilístico y determinístico en la falla del talud de la subestación eléctrica. Se realizó con un tipo de investigación según su finalidad y propósito, básica; con un nivel de investigación exploratorio. Las muestras fueron los datos de las propiedades mecánicas del suelo encontradas en el talud. Concluyendo que la superficie crítica de falla no coincide por métodos obtenidos (determinista y probabilística).

Bravo (2020) en su tesis para optar el grado de Maestro titulada: "Análisis estratégico y evaluación, estabilidad de taludes del Ccaccañan distrito Tambobamba, provincia de Cotabambas - región Apurímac periodo 2019". Cuyo objetivo general fue realizar la evaluación de la estabilidad del talud de la zona Ccaccañan. Además, la metodología de la investigación fue aplicada, nivel descriptivo; cuya muestra es en base al mapeo geomecánica realizado; guiándose con las normas establecidas en el país. Al finalizar su trabajo concluyó que el factor de seguridad (FS) analizado estáticamente y pseudodinámicamente son de 1.5 y 1.2, respectivamente.

Medina (2020) en su tesis titulada: "Estabilización de taludes de gran altura analizados mediante métodos de equilibrio límite, carretera Taquebamba - San Mateo, Aymaraes, Apurímac 2020". Cuyo objetivo general es estabilizar los taludes de gran altura con el método de equilibrio límite del lugar ya citado. Su investigación se realizó con una metodología deductiva, tipo aplicada, con un nivel descriptivo y diseño no experimental; con una muestra de las características técnicas de 3 taludes. Al finalizar su trabajo concluyó que el talud más crítico tiene un factor de seguridad de (FS) de 0.97 en condiciones estáticas y 0.78 en condiciones pseudo-estáticas, siendo en ambos casos menor a 1, entonces siendo inestable los taludes.

3.2. Bases teóricas

3.2.1. Probabilidad de un evento

Que ocurra un evento A , está representado por $P[A]$ y satisface la siguiente expresión:

$$0 \leq P[A] \leq 1 \quad (1)$$

Se puede deducir que la probabilidad que no suceda ningún evento (\emptyset) del espacio muestral es 0 y la probabilidad que suceda cualquiera de los eventos del espacio muestral (S) es 1; es decir:

$$P[\emptyset] = 0 \quad (2)$$

$$P[S] = 1 \quad (3)$$

Imaginémonos que en un experimento de " N " eventos, " m " son el evento A , entonces la probabilidad del evento A esta dado por:

$$P[A] = \frac{m}{N} \quad (4)$$

Ahora bien, presumamos que existen los eventos $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ del espacio muestral S , donde cada uno de estos sucesos son mutuamente excluyentes y colectivamente exhaustivas, por lo tanto:

$$P[A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n] = P[A_1] + P[A_2] + \dots + P[A_n] = P[S] = 1 \quad (5)$$

En caso contrario, de que los eventos no sean mutuamente excluyentes, se tendría lo siguiente para dos eventos:

$$P[A \cup B] = P[A] + P[B] - P[A \cap B] \quad (6)$$

El complemento del evento A se expresa como A^c y la posibilidad que suceda el complemento del evento A es:

$$P[A^c] = 1 - P[A] \quad (7)$$

3.2.2. Probabilidad condicional

En algunas ocasiones la posibilidad de que un evento A suceda está condicionada a un evento B que ya ha ocurrido y este dado por:

$$P[A|B] = \frac{P[A \cap B]}{P[B]} \quad (8)$$

3.2.3. Variable aleatoria y distribución probabilística

Las variables aleatorias se definen como una función $X(s)$ cuyo resultado es un número real, donde el espacio muestral es $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ y $s \in S$. Además, para cada resultado de s de la función aleatoria $X(s) = x$, existe un único valor.

De la definición del párrafo anterior se concluye que los valores que puede tomar $X(s)$ son:

$$X(s) \in \{x_1, x_2, x_3, \dots\} \quad (9)$$

a. Variable aleatoria discreta. La variable aleatoria discreta son valores que solo pueden ser contados:

$$X(s) \in \{0, 1, 2, \dots\} \quad (10)$$

Consideremos el conjunto de pares ordenados $(x, f_x(x))$ que es la distribución probabilística de la variable aleatoria discreta X para cada valor posible de x . Entonces, debe cumplir:

$$0 \leq f_x(x) \leq 1 \quad (11)$$

$$\sum f_x(x) = 1 \quad (12)$$

$$P[X = x] = f_x(x) \quad (13)$$

Donde $f_x(x)$ se denomina función de probabilidad de masa de X .

b. Variable aleatoria continua. Una variable aleatoria continua es aquel que puede optar por cualquier valor de los números reales, por ellos que la probabilidad que tome un valor de la recta real es infinitamente pequeña; es por este motivo que estas variables se analizan en probabilidades relativas:

$$P[x < X \leq x + dx] = f_x(x)dx \quad (14)$$

Donde $f_x(x)$ se denomina función de probabilidad de densidad de X . Como dx tiende a cero, entonces:

$$P[X = x] = f_x(x)dx \quad (15)$$

La función de probabilidad de densidad $f_x(x)$ debe cumplir las siguientes condiciones:

$$0 \leq f_x(x) < \infty, \text{ para todo } -\infty < x < \infty \quad (16)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_x(x)dx = 1 \quad (17)$$

$$P[a < X < b] = \int_a^b f_x(x)dx \quad (18)$$

3.2.4. Medidas de tendencia central y variabilidad

a. Media. La media es una característica importante de las variables aleatorias, pues estas hacen referencia sobre su tendencia central (Griffiths & Fenton, 2007). Y esta definida por:

$$\mu_x = E[X] = \sum_x x f_x(x), \quad \text{si } X \text{ es discreta} \quad (19)$$

$$\mu_x = E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x)dx, \quad \text{si } X \text{ es continua} \quad (20)$$

b. Varianza y desviación estándar. También es otra característica de las variables aleatorias, donde expresa la dispersión de una serie de datos respecto a su media:

$$\sigma_x^2 = Var[X] = E[(X - \mu_x)^2] = \sum_x (x - \mu_x)^2 f_x(x), \text{ si } X \text{ es discreta} \quad (21)$$

$$\sigma_x^2 = \text{Var}[X] = E[(X - \mu_x)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 f_x(x) dx, \text{ si } X \text{ es continua} \quad (22)$$

El coeficiente de variación es una relación adimensional que representa la relación entre desviación y la media:

$$v = \frac{\sigma}{\mu} \quad (23)$$

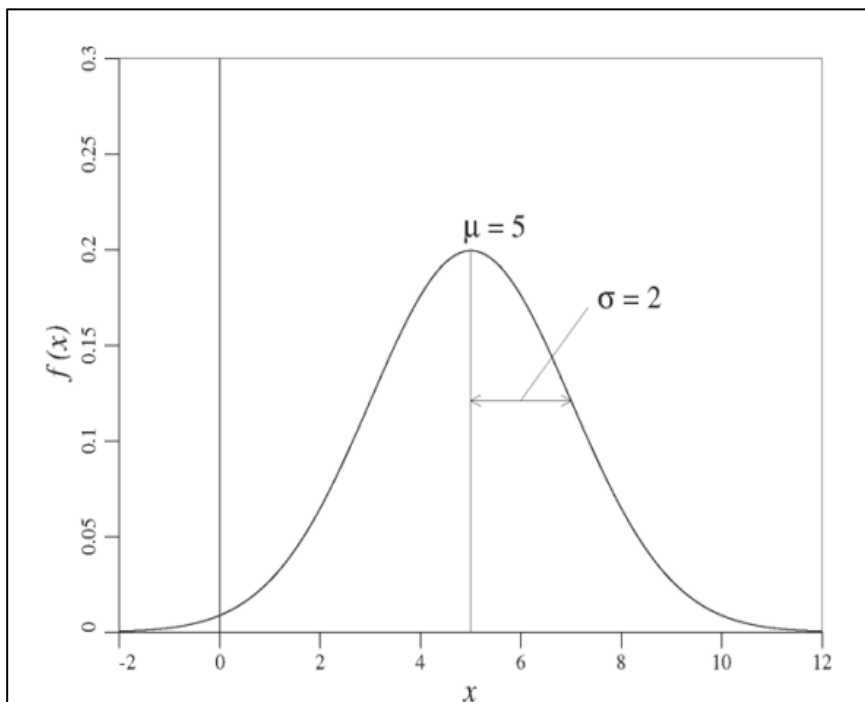
3.2.5. Distribución de probabilidad continua

a. Distribución normal. Es una función probabilística de densidad, también llamada distribución de Gauss y está representado por:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad -\infty < x < \infty \quad (24)$$

Figura 1

Distribución normal con una media de 5 y desviación estándar 2



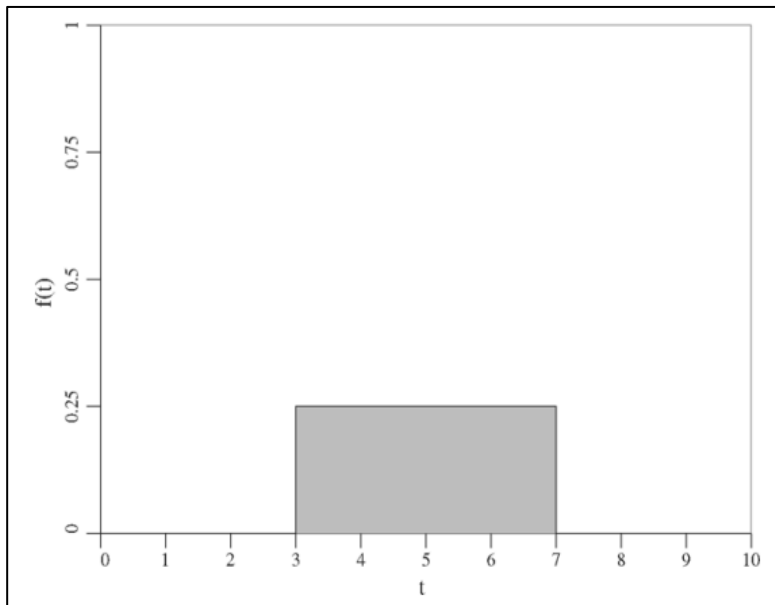
Nota. Adaptado de *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* (p. 38), por D. V. Griffiths y Gordon A. Fenton, 2007, SpringerWienNewYork.

b. Distribución uniforme. Es una función probabilística de densidad más simple y este dado por:

$$f(x) = \frac{1}{\beta - \alpha}, \quad \alpha \leq x \leq \beta \quad (25)$$

Figura 2

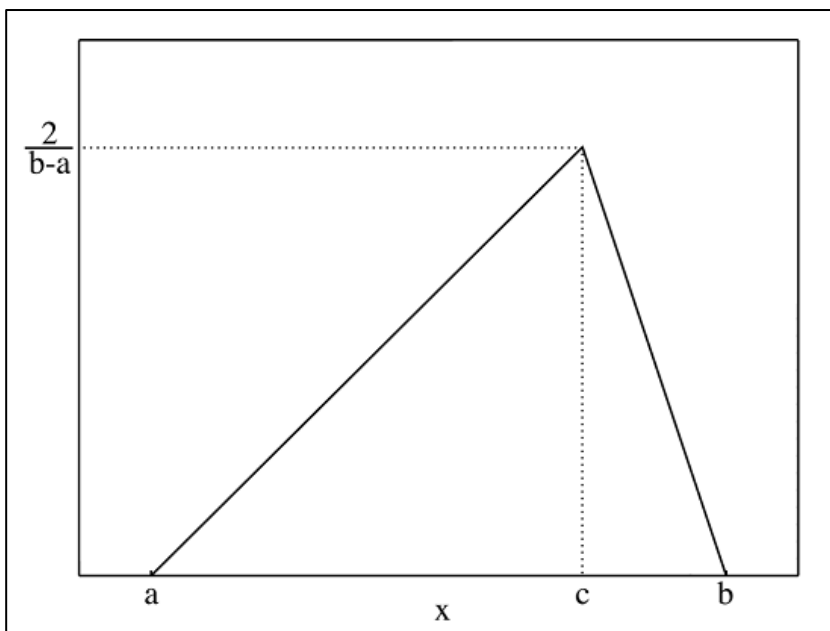
Distribución uniforme de intervalos de 3 a 7



Nota. Adaptado de Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering (p. 35), por D. V. Griffiths y Gordon A. Fenton, 2007, SpringerWienNewYork.

c. Distribución triangular. Es una relación de probabilidad de densidad que tiene límites y una moda, y se expresa como:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}, & c < x \leq b \end{cases} \quad (26)$$

Figura 3*Distribución triangular*

Nota. Donde el área formada del triángulo es 1. Elaboración propia.

Se tiene que la media de la distribución triangular es:

$$\mu = \frac{a + b + c}{3} \quad (27)$$

La varianza de esta distribución esta dado por:

$$\sigma^2 = \frac{a^2 + b^2 + c^2 - ab - bc - ac}{18} \quad (28)$$

d. Distribución beta. Para poder entender la distribución beta, primero se tiene que definir la función beta $B(\alpha, \beta)$:

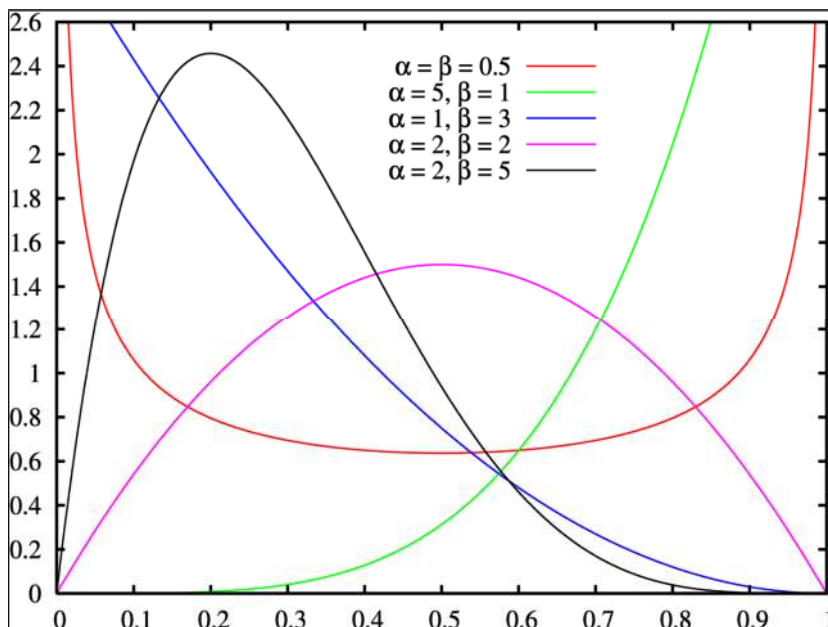
$$B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx, \quad \alpha, \beta > 0 \quad (29)$$

Teniendo en cuenta la función beta, podemos expresar la distribución beta que esta dado por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(\alpha, \beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1}, & 0 < x < 1 \\ 0, & x \notin (0, 1) \end{cases} \quad (30)$$

Figura 4

Ejemplos de distribución beta



Nota. Ejemplo de distribución beta para diferentes de valores de α, β . Adaptada de Cumulative distribution function for the beta, por Wikipedia, 2005, Flickr (https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_beta), CC BY-SA 3.0.

Además, le media y varianza de la función de densidad beta esta expresado, respectivamente, por:

$$\mu = \frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (31)$$

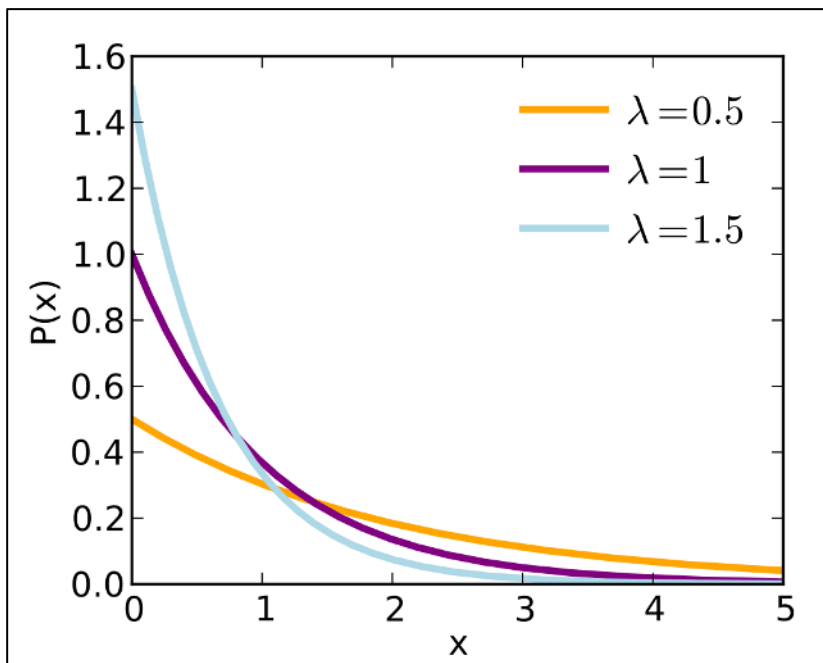
$$\sigma^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta + 1)(\alpha + \beta)^2} \quad (32)$$

e. Distribución exponencial. Se define la función exponencial, cuando la función de probabilidad de densidad esta simbolizado:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}, \quad x > 0 \text{ y } \lambda \geq 0 \quad (33)$$

Figura 5

Distribución exponencial para diferentes valores



Nota. Ejemplo de distribución exponencial para diferentes de valores de λ . Adaptada de Plot of the density function of several exponential distributions, por Wikipedia, 2010, Flickr (es.wikipedia.org/wiki/Distribuci3n_exponencial), CC BY-SA 3.0.

Donde la media y varianza es, respectivamente:

$$\mu = \frac{1}{\lambda} \quad (34)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (35)$$

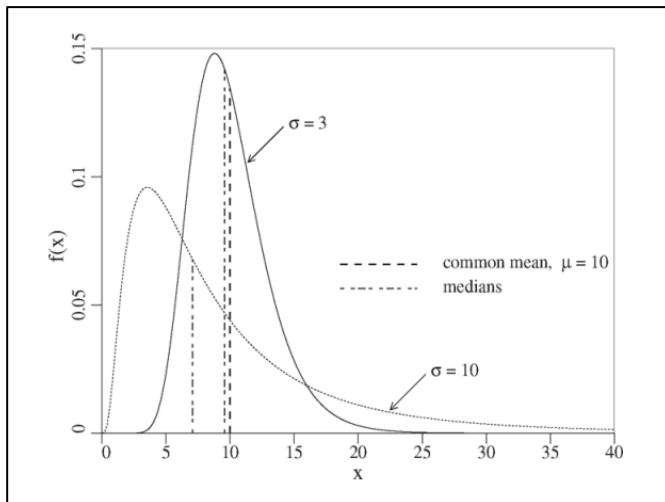
f. Distribución logarítmica. La distribución logarítmica está representada por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma_{\ln x}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right], \quad 0 < x < \infty \quad (36)$$

Donde:

$$\mu_{\ln x} = E[\ln X] \quad (37)$$

$$\sigma_{\ln x}^2 = Var[\ln X] \quad (38)$$

Figura 6*Ejemplo de distribución logarítmica*

Nota. Adaptado de *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* (p. 44), por D. V. Griffiths y Gordon A. Fenton, 2007, SpringerWienNewYork.

g. Distribución gamma. Dada la función gamma:

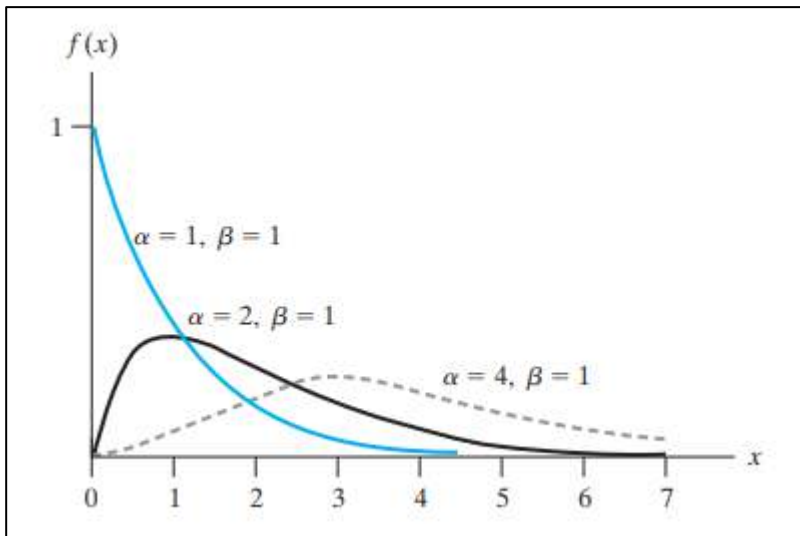
$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (39)$$

Entonces, la distribución gamma se expresa por:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}; & \text{para } x > 0; \alpha > 0; \beta > 0 \\ 0; & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (40)$$

Figura 7

Distribución gamma para diferentes valores



Nota. Adaptado de Probability and Statist for Engineers (p. 155), por Richard A. Johnson, 2018, Pearson.

Además, se tiene la media y varianza, respectivamente:

$$\mu = \alpha\beta \quad (41)$$

$$\sigma^2 = \alpha\beta^2 \quad (42)$$

3.2.6. Aspectos generales de taludes en suelos

Cuando una superficie esta inclinada con cierto ángulo con respecto a la horizontalidad se denomina talud (Braja, 2015).

Algunos factores que influyen la estabilidad de taludes son:

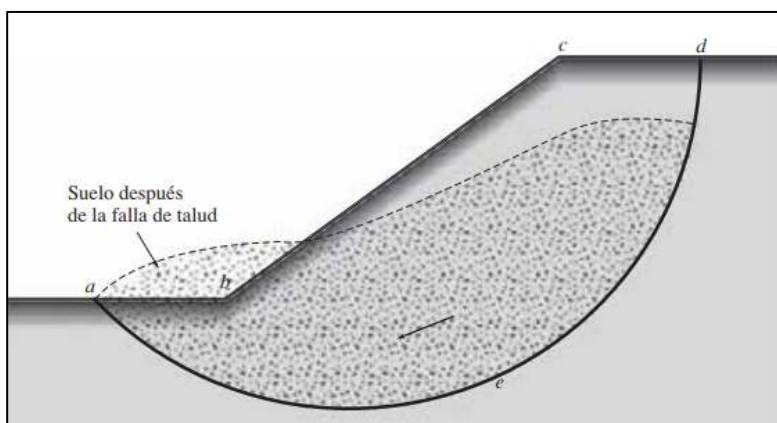
- Lluvia.
- Cargas externas.
- Aspectos geológicos.
- Sismo
- Erosión.
- Condiciones de presión de poros y vaciado rápido.

- Excavaciones o rellenos.

En la figura 8, representa un talud de suelo con su superficie de falla *abcdea*; es decir, la masa de suelo presente puede fallar dependiendo del factor de seguridad de la falla del talud en forma cilíndrica.

Figura 8

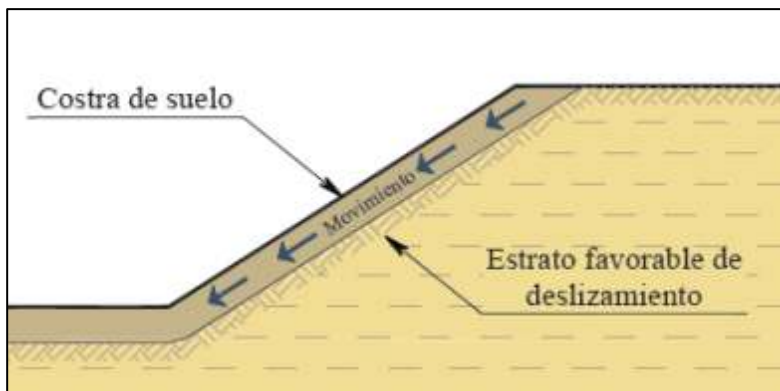
Falla de talud



Nota. Adaptado de Fundamento de la Ingeniería Geotécnica (p. 334), por Braja M. Das, 2015, CENGAGE Learning.

A continuación, se presenta las principales fallas más comunes:

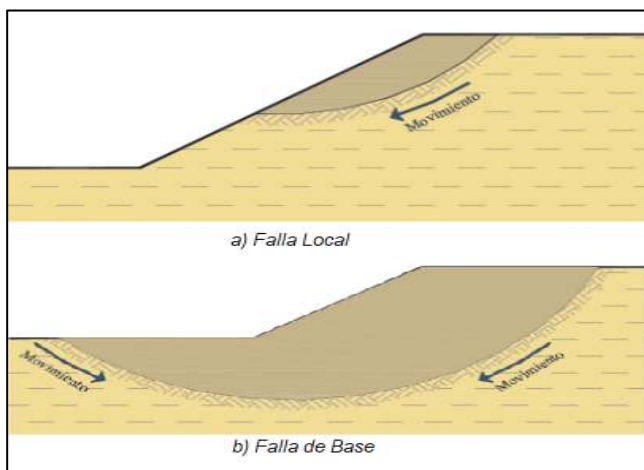
- Falla por deslizamiento superficial. Para Juárez & Rico (1973) explican que “es un fenómeno donde la superficie de falla fluye extremadamente lento como material viscoso” (p. 179).

Figura 9*Falla superficial*

Nota. Adaptada de Estabilidad de un Talud y Factores que Influyen, por EADIC, 2023, Flickr (<https://eadic.com/blog/entrada/estabilidad-de-un-talud-factores-que-influyen/>), CC BY-SA

3.0.

- Falla por rotación. Es cuando tiene una forma cilíndrica o conconoidal; pudiendo ser local, cuando la falla está por encima del pie del talud; o falla de base, cuando la falla está por debajo del pie del talud.

Figura 10*Falla por rotación (local y de base)*

Nota. Adaptada de Estabilidad de un Talud y Factores que Influyen, por EADIC, 2023, Flickr (<https://eadic.com/blog/entrada/estabilidad-de-un-talud-factores-que-influyen/>), CC BY-SA

3.0.

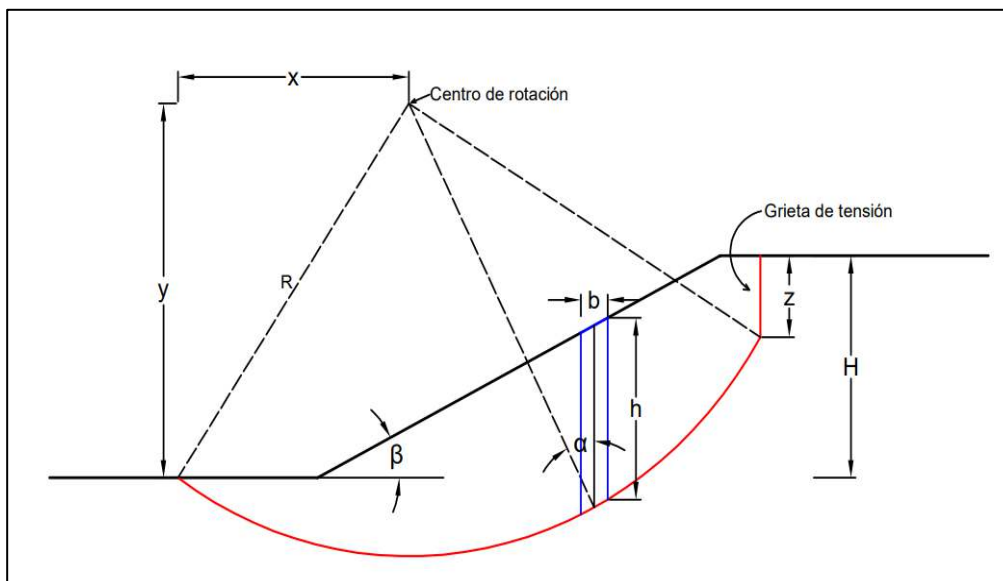
- Falla por traslación: Este tipo de falla la masa se desliza de manera que el cuerpo se mueve hacia afuera y abajo más o menos plana u ondulada con respecto y una masa de fija de roca (IGME, 1986).
- Falla por flujo: Este tipo de falla se hace presente cuando el talud no esta consolidado y que por efecto del agua puede desprenderse.
- Falla por licuación: Cuando la resistencia del esfuerzo cortante del suelo disminuye drásticamente se produce el fenómeno llamado licuación produciendo el colapso del suelo.

3.2.7. Método Spencer

Para entender el método Spencer nos guiaremos en la figura 11, donde se puede observar un talud con una altura H , con un ángulo con respecto a la horizontal de β ; generando una falla circular de radio R , una grieta de tensión de longitud z en la parte superior del talud. Además, se tiene una rebanada del talud de base b y altura h que generan un ángulo α con respecto a la vertical con el centro de rotación.

Figura 11

Dimensiones de la superficie de deslizamiento de un talud

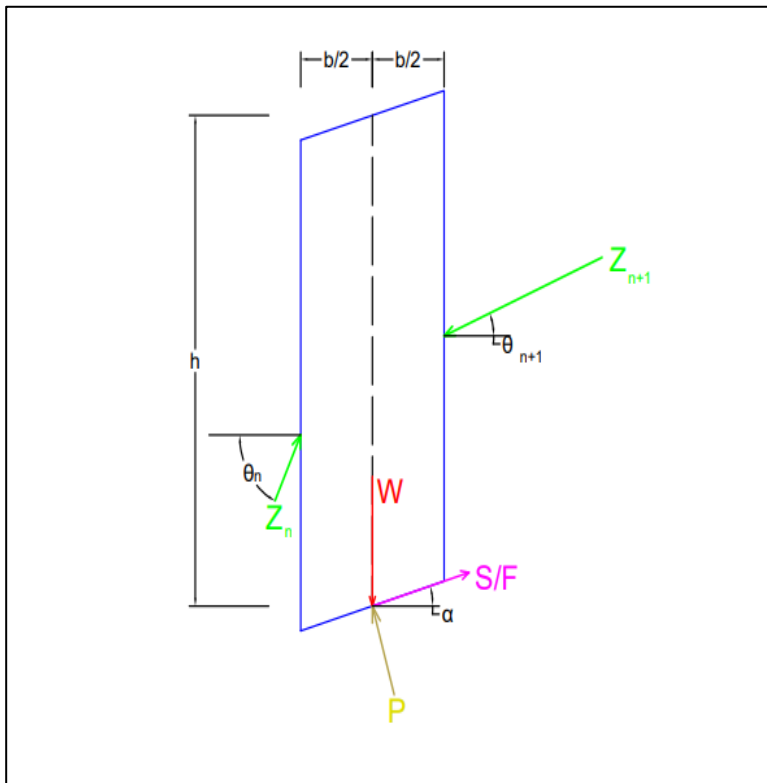


Nota. Dimensiones del círculo de falla de radio R . Elaboración propia.

En la figura 12, se extrae la rebanada del talud y se puede observar las cargas que actúan. El peso de la rebanada W , reacción total normal a la base de la rebanada P , fuerzas entre rebanadas Z_n y Z_{n+1} , y por ultimo la fuerza cortante movilizada S/F .

Figura 12

Fuerzas actuantes en una rebanada del talud (método Spencer)

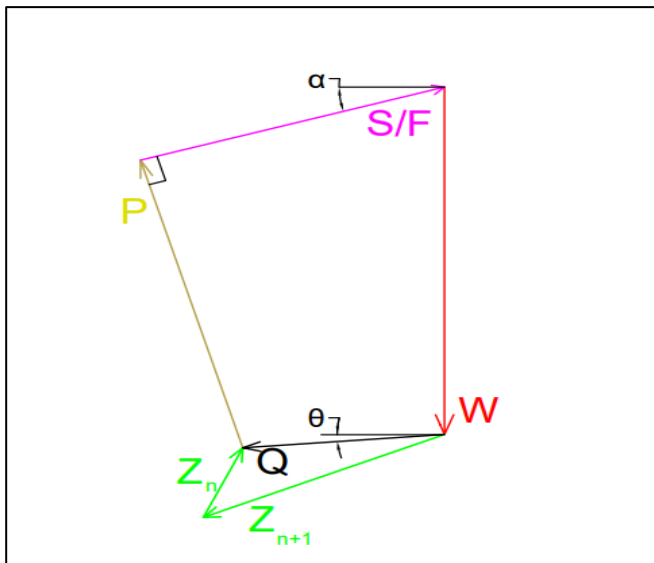


Nota. Fuerzas actuantes en la rebanada para el método Spencer. Elaboración propia.

Vectorialmente las fuerzas actuantes en la rebanada se definen en la Figura 13, donde se puede observar una nueva carga Q que es el resultado de las fuerzas entre rebanadas.

Figura 13

Análisis vectorial de las fuerzas que actúan en la rebanada



Nota. Comportamiento de las fuerzas vectorialmente. Elaboración propia.

Ya definida las cargas que actúan en una rebanada, se realizara el análisis de cada una de ellas. El peso de la rebanada es:

$$W = \gamma b h \quad (43)$$

Donde:

γ : Peso específico del suelo.

b : Base de la rebanada.

h : Altura de la rebanada.

La reacción total normal de la base en la base P de la rebanada este dado por:

$$P = P' + \mu b \sec \alpha \quad (44)$$

Donde:

P' : Reacción debido al esfuerzo efectivo normal a la base de la rebanada.

μ : Presión de poros.

b : Base de la rebanada.

α : Angulo de la base del corte con respecto a la horizontal.

La fuerza cortante actuante S_m es la relación entre la fuerza cortante disponible S y el factor de seguridad F :

$$S_m = \frac{S}{F} \quad (45)$$

La fuerza cortante disponible S es:

$$S = c' b \sec \alpha + P' \tan \phi' \quad (46)$$

Donde:

c' : Cohesión del suelo.

ϕ' : Angulo de fricción del suelo.

Por lo tanto; la fuerza cortante actuante S_m , desprendiendo de la ecuación (45) y (46) se obtiene:

$$S_m = \frac{c' b \sec \alpha}{F} + \frac{P' \tan \phi'}{F} \quad (47)$$

De las figuras 12 y 13, se obtiene la resultante del par de fuerzas que actúan entre rebanadas, Q :

$$Q = \frac{\frac{1}{F} [c' b \sec \alpha + \tan \phi' (W \cos \alpha - \mu b \sec \alpha)] - W \sin \alpha}{\cos(\alpha - \theta) \left[1 + \frac{\tan \phi'}{F} \tan(\alpha - \theta) \right]} \quad (48)$$

Ahora bien, de la misma forma el factor de seguridad F , esta dado por la siguiente expresión:

$$F = \frac{\sum [c' b \sec \alpha + \tan \phi' (W \cos \alpha - \mu b \sec \alpha)]}{\sum W \sin \alpha} \quad (49)$$

Además, para que el desplazamiento de falla corresponda a lo estimado, debe cumplir las siguientes condiciones:

$$\sum (Q \sin \theta) = 0 \quad (50)$$

$$\sum (Q \cos \theta) = 0 \quad (51)$$

$$\sum [RQ \cos(\alpha - \theta)] = 0 \quad (52)$$

3.2.8. Simulación Monte Carlo

La simulación Monte Carlo es una estrategia que se utiliza en la matemática para comprobar la posibilidad de que se dé un suceso incierto (IBM, 2023).

La simulación Monte Carlo denominado también simulación de probabilidad múltiple consiste en aprovechar la distribución probabilística de los elementos que constituyen el fenómeno para obtener valores.

Los pasos para poder realizar la simulación Monte Carlo son:

- Generar aleatoriamente los datos de entrada producto de la incertidumbre del sistema.
- Ejecutar una simulación para cada uno de los datos de entrada.
- Analizar las salidas de las simulaciones.

A continuación, se presenta matemáticamente la simulación Montecarlo:

$$P[\text{Falla}] = \frac{\#simulaciones (FS < 1)}{\#total de simulaciones} \quad (53)$$

3.3. Definición de términos

- Talud: Perfil conseguido tras una excavación de un terreno que al final tiene un ángulo de inclinación con respecto a la horizontal (MVCS, 2017).
- Factor de seguridad: Es una disposición crítica que se esgrime para evaluar la estabilidad del talud y predecir si existe un riesgo de incremento gradual. El factor de seguridad se computa contrastando las fuerzas de resistencia con las fuerzas de carga que actúan sobre el talud. El factor de seguridad de la falla del talud es la relación entre la resistencia media del suelo al corte (Braja, 2015).

- Incertidumbre: Se denomina incertidumbre a la inexactitud de certeza, de conocimiento seguro en algún tema (RAE, 2020).
- Probabilidad: La probabilidad de un evento dentro de un espacio muestral esta dado como la relación de número de elementos del evento y el número de elementos del espacio muestral (Assis, 2002).
- Angulo de fricción: Es una propiedad importante que describe la resistencia al deslizamiento entre las partículas de suelo (Braja, 2015).
- Cohesión: Es una propiedad mecánica del suelo que describe la capacidad de las partículas de suelo para adherirse entre si debido a fuerzas cohesivas (Juárez y Rico, 2005).
- Peso específico: Es una característica donde relaciona el peso con el volumen del suelo (Juárez y Rico, 2005).
- Simulación Montecarlo: Es una técnica estadística y computacional que utiliza números aleatorios para modelar el comportamiento de sistemas complejos y analizar la incertidumbre en diversos procesos (IBM, 2023).
- Evento: Es el conjunto de resultados que se puede observar producto de un experimento (Mendenhall et al, 2010)
- Espacio muestral: El conjunto de todos los eventos generan el espacio muestral (Mendenhall et al, 2010)
- Distribución de probabilidad: Una distribución de probabilidad muestra cómo se comporta las probabilidades de suceso de los diferentes valores posibles de una variable aleatoria (Griffiths y Fenton, 2007).
- Números aleatorios: Son números generados al azar (Vanmarcke, 1997).
- Parámetros geotécnicos: Son las características geotécnicas presentes en los diferentes estrados existente en el talud; estos son: peso específico, cohesión y ángulo de fricción (Cruz, 2012).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de la investigación

Tipo de investigación

La investigación **aplicada** es aquella que mediante la teoría se abastece para poder solucionar problemas prácticos (Arias, 2020). Es por este motivo que la tesis es una investigación del tipo aplicada porque se utilizó la simulación Monte Carlo y el método Spencer como base teórica para solucionar el problema general que fue obtener el factor de seguridad media y la probabilidad de falla del talud.

Nivel de investigación

El nivel de investigación **descriptivo** tiene como finalidad escoger las cualidades esenciales del fenómeno de estudio para poder describir su comportamiento (Bernal, 2010), en su primera parte la investigación, tiene este alcance debido a que se describió las características geométricas y los parámetros geotécnicos del talud. El nivel **explicativo** tiene la particularidad de instituir causa – efecto, relacionando la variable independiente con la dependiente (Arias, 2020); la investigación tiene también el alcance explicativo puesto que la variable incertidumbre de los parámetros geotécnicos es causante del factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud.

Diseño de la investigación

El diseño de investigación es de tipo **no experimental** debido a que las variables de estudio, las características geométricas y parámetros geotécnicos, no se manipularon; es decir, estos datos se obtuvieron sin modificar en su contexto natural (Arias, 2020).

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1. Temporal

La investigación se desarrolló desde mayo hasta noviembre del 2024, en este lapso se consideró la recolección de muestras y procesamiento de los datos obtenidos.

4.2.2. Espacial

El objeto de estudio, el talud, está ubicado en la zona denominada Pucca Pucca adyacente a la Vía de Evitamiento del distrito de Abancay, Provincia de Abancay de la Región Apurímac. A continuación, se presenta las coordenadas UTM del talud:

- Zona: 18L
- Este: 728 396.700 m
- Norte: 8 492 629.618 m
- Altitud: 2544.00 msnm

4.3. Población y muestra

La población es la integridad del objeto de estudio o análisis que tienen similar cualidades, propiedad o características (Elías, 2005). Es en tal sentido la población para la presente tesis fueron todos los puntos del talud en la zona Pucca Pucca donde se puede obtener los parámetros geotécnicos.

La muestra se define como un subconjunto que representa a la población de estudio o análisis correspondiente (Arias, 2020). Es por eso por lo que la muestra fueron 10 puntos del talud en la zona Pucca Pucca donde se realizó las calicatas y obtener las muestras de suelo, estos puntos fueron definidos por criterios intencionales.

El muestreo es la técnica a través del cual se estudia las características, cualidades o propiedades de la muestra (Elías, 2005). Entonces la técnica que se utilizó para estudiar la muestra en la investigación no probabilística y siguiendo criterios intencionales.

4.4. Instrumentos

Las técnicas de recolección de datos son las maneras de conseguir información para alcanzar el objetivo planteado de la investigación (Arias, 2020).

Los instrumentos de recolección de datos son los recursos que se utilizaron para conseguir y acopiar la información (Arias, 2020).

La tabla 2 se muestra los técnica e instrumentos a utilizar para obtener los datos necesarios de las variables.

Tabla 2

Técnica e instrumento de recolección de datos

Variable	Dimensión	Técnica	Instrumento
<u>Características geométricas.</u>	Progresiva	Levantamiento topográfico	Ficha de recolección de datos
	Elevación		
<u>Incertidumbre de los parámetros geotécnicos.</u>	Angulo de fricción y cohesión.	Corte Directo (ASTM D 3080)	Ficha de recolección de datos de laboratorio
	Peso específico.	Peso específico de solidos (ASTM D 854)	
<u>Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud.</u>	Factor de seguridad	Método Spencer	Ficha de recolección de datos
	Probabilidad de falla	Simulación Montecarlo	

Nota: Elaboración propia.

4.5. Procedimientos

El procedimiento considerado para desarrollar la tesis consta de varios pasos clave cuidadosamente planificados para obtener el factor de seguridad media y la probabilidad de falta del talud estudiado. Primero, se realizó un estudio topográfico del objeto para obtener una descripción precisa de sus **características geométricas** del talud.

En la segunda fase, se recolecto **muestras de suelo** representativas de acuerdo con el protocolo de muestreo para garantizar la confiabilidad de los datos. Estas muestras fueron necesarias para análisis posteriores, ya que se permitió caracterizar completamente las propiedades del suelo en cuestión.

La tercera fase incluye ensayos de campo y de laboratorio del suelo extraído. Los resultados obtenidos proporcionaron los parámetros necesarios para la **estimación de datos geotécnicos**.

Una vez obtenido los datos de los ensayos de laboratorio se procesó para poder analizar **las incertidumbres de los parámetros geotécnicos**. Este análisis permitió

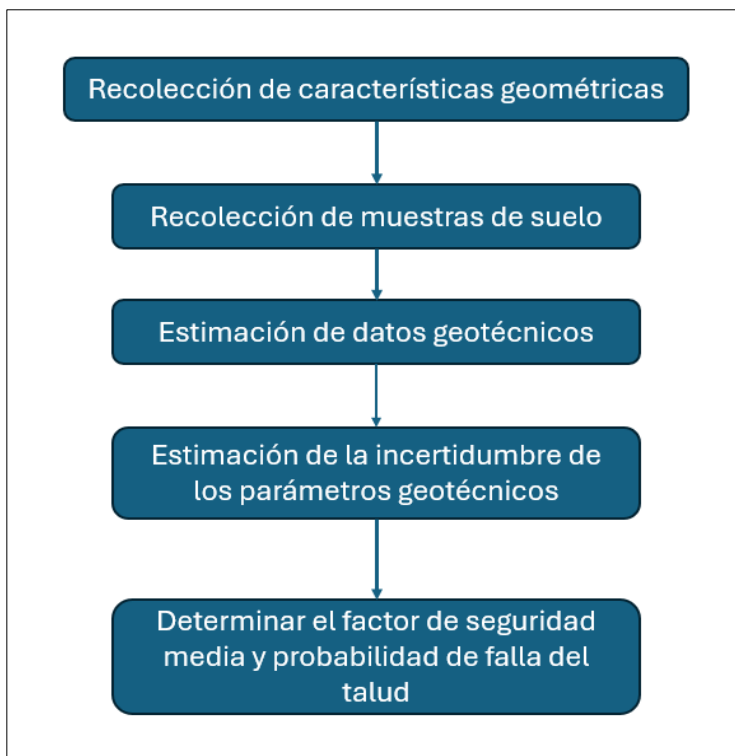
estimar la variabilidad de los datos y establecer intervalos de confianza, lo cual es crucial para obtener resultados realistas y confiables.

Finalmente, teniendo en cuenta la información anterior, se procedió a obtener el **factor de seguridad media y la probabilidad de falla de talud**. Estos valores no sólo evaluaron la estabilidad en los escenarios actuales, sino que también predicen su comportamiento ante posibles cambios en las condiciones geotécnicas.

La figura 14, se presenta el flujograma de los pasos de cómo se realizó la investigación.

Figura 14

Flujograma del desarrollo de la tesis



Nota. Flujograma de los pasos para realizar la tesis. Elaboración propia.

4.6. Análisis de datos

Para describir en detalle las características geométricas del talud, se realizó un levantamiento topográfico, a partir del cual se obtuvo datos fundamentales para su representación gráfica. Este levantamiento permitió identificar las curvas de nivel del terreno, las cuales proporcionan información esencial acerca de las elevaciones. Esta información fue crucial para realizar un análisis preciso de la estabilidad del talud y determinar la posibilidad de falla.

Para el análisis de la incertidumbre en los parámetros geotécnicos, se consideró las características del peso específico, ángulo de fricción y cohesión del suelo del estrato del talud. Para cada uno de estos parámetros, se consideró su distribución probabilística conforme a los resultados conseguidos en las pruebas ejecutadas. Esto permitió evaluar de manera más precisa las variaciones y el comportamiento esperado de los materiales.

Para determinar el factor de seguridad media, se utilizó el método Spencer donde:

$$FS = \begin{cases} < 1; El talud falla \\ = 1; El talud se encuentra en equilibrio \\ > 1; El talud no falla \end{cases} \quad (54)$$

Para determinar la posibilidad de falla del talud, se aplicó la simulación de Monte Carlo, un enfoque estadístico que permitió modelar el comportamiento incierto de los parámetros geotécnicos. En este método, los parámetros como el ángulo de fricción, la cohesión y el peso específico se representaron mediante funciones probabilísticas que reflejan su variabilidad e incertidumbre, obtenidas a partir de ensayos geotécnicos.

El proceso consistió en generar múltiples simulaciones, donde en cada una de ellas se seleccionaron valores aleatorios de los parámetros, dentro de los rangos definidos por sus respectivas distribuciones probabilísticas. Al realizar este proceso un gran número de veces (18000 simulaciones para nuestro caso), se pudo aproximar la posibilidad de falla del talud. Esta probabilidad es representativa del comportamiento real del talud bajo las

condiciones actuales, y proporciona una base matemática sólida para la estimación de riesgos y la toma de decisiones de diseño y mitigación.

$$P[\textit{Falla}] = \frac{\#simulaciones (FS < 1)}{\#total de simulaciones} \quad (55)$$

4.7. Consideraciones éticas

El trabajo se realizó con responsabilidad donde se obtuvo los datos y resultados de manera adecuada y siguiendo los métodos establecidos. Además, se citó los conceptos, definiciones u opiniones de los autores.

V. Resultados y discusiones

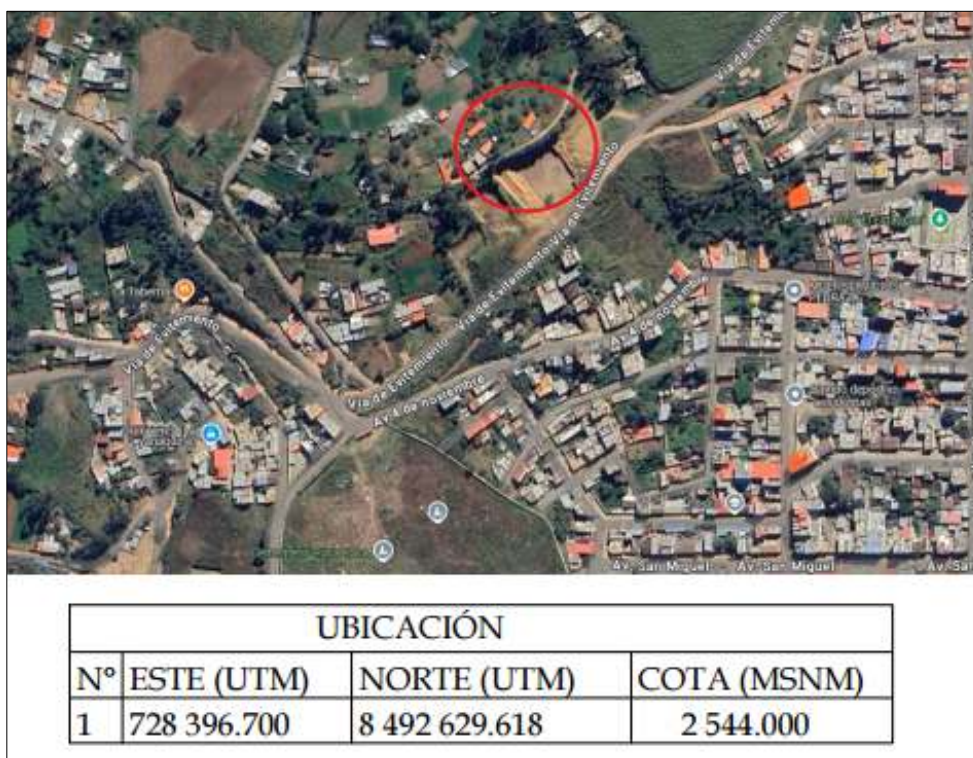
De acuerdo con los objetivos planteado, los resultados y discusiones de este apartado se organiza, primero con los objetivos específicos y finalmente con el objetivo general. Como se detalla a continuación:

5.1. Describir las características geométricas del talud

El objeto de estudio (talud) está ubicado en la zona Pucca Pucca en la ciudad de Abancay y adyacente a la Vía de Evitamiento como evidencia en la Figura 15.

Figura 15

Ubicación del proyecto



Nota. El círculo rojo y el cuadro refleja exactamente la ubicación del talud (objeto de estudio). Elaboración propia.

Para caracterizar geométricamente el área de estudio, se realizó un levantamiento topográfico empleando un dron y GPS diferencial. Estos equipos permitieron obtener una ortofoto de alta resolución georreferenciada, la cual se presenta en la Figura 16. En la imagen, se ha destacado un círculo rojo, señalando el talud donde se consideran el factor

de seguridad media y la probabilidad de falla. Estos datos fueron fundamentales para comprender las condiciones de estabilidad y permitir una evaluación precisa del riesgo de falla.

Figura 16

Ortofoto del talud



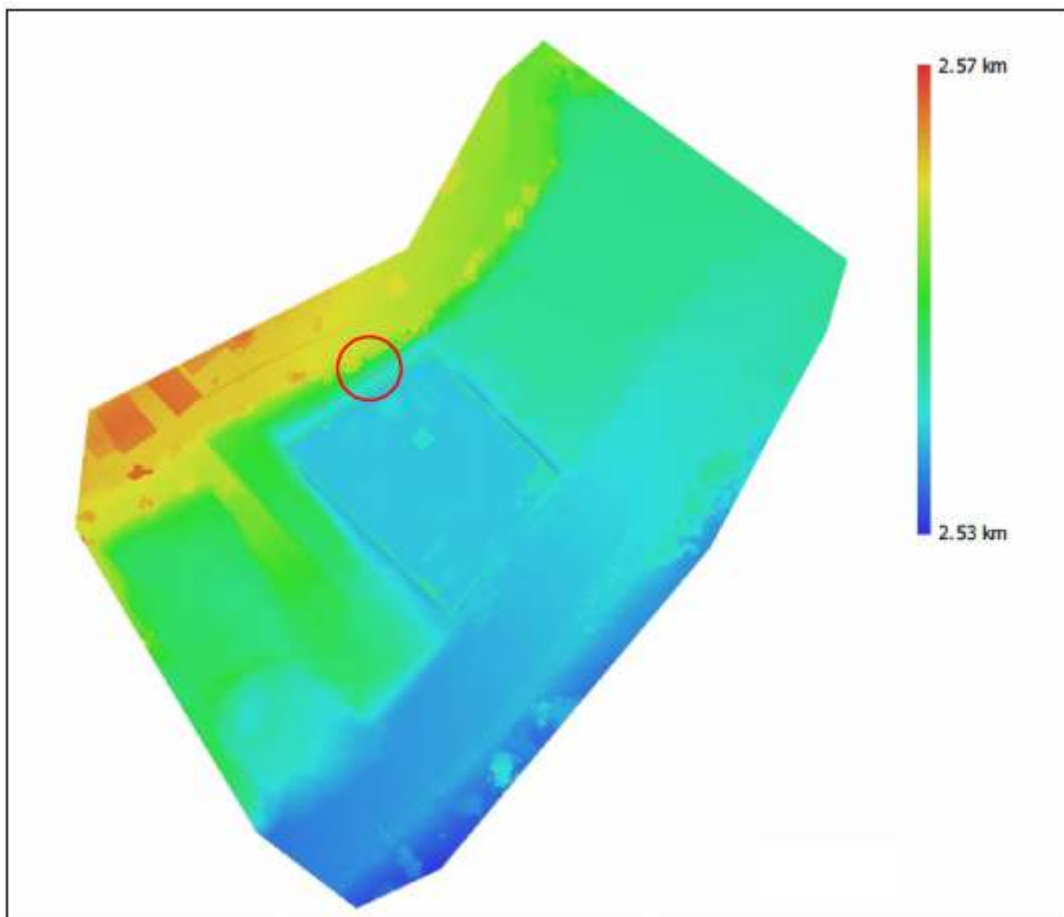
Nota. El círculo rojo ubica al talud en cuestión. Elaboración propia.

A partir de la ortofoto obtenida, se generó un modelo digital de elevaciones, presentado en la Figura 17. Este modelo utiliza una degradación de colores para representar las variaciones de altura en la zona de estudio: los tonos azules corresponden a las elevaciones más bajas (2,53 km) y los tonos rojos a las más altas (2,57 km). En el área resaltada con un círculo rojo, se observa una transición brusca en la coloración, cambiando rápidamente de celeste a amarillo, lo que indica una variación significativa en

la elevación en ese sector señalado. Este cambio abrupto es indicativo de pendientes elevadas, el cual influye en el comportamiento de estabilidad del talud y es clave para el análisis del riesgo de falla.

Figura 17

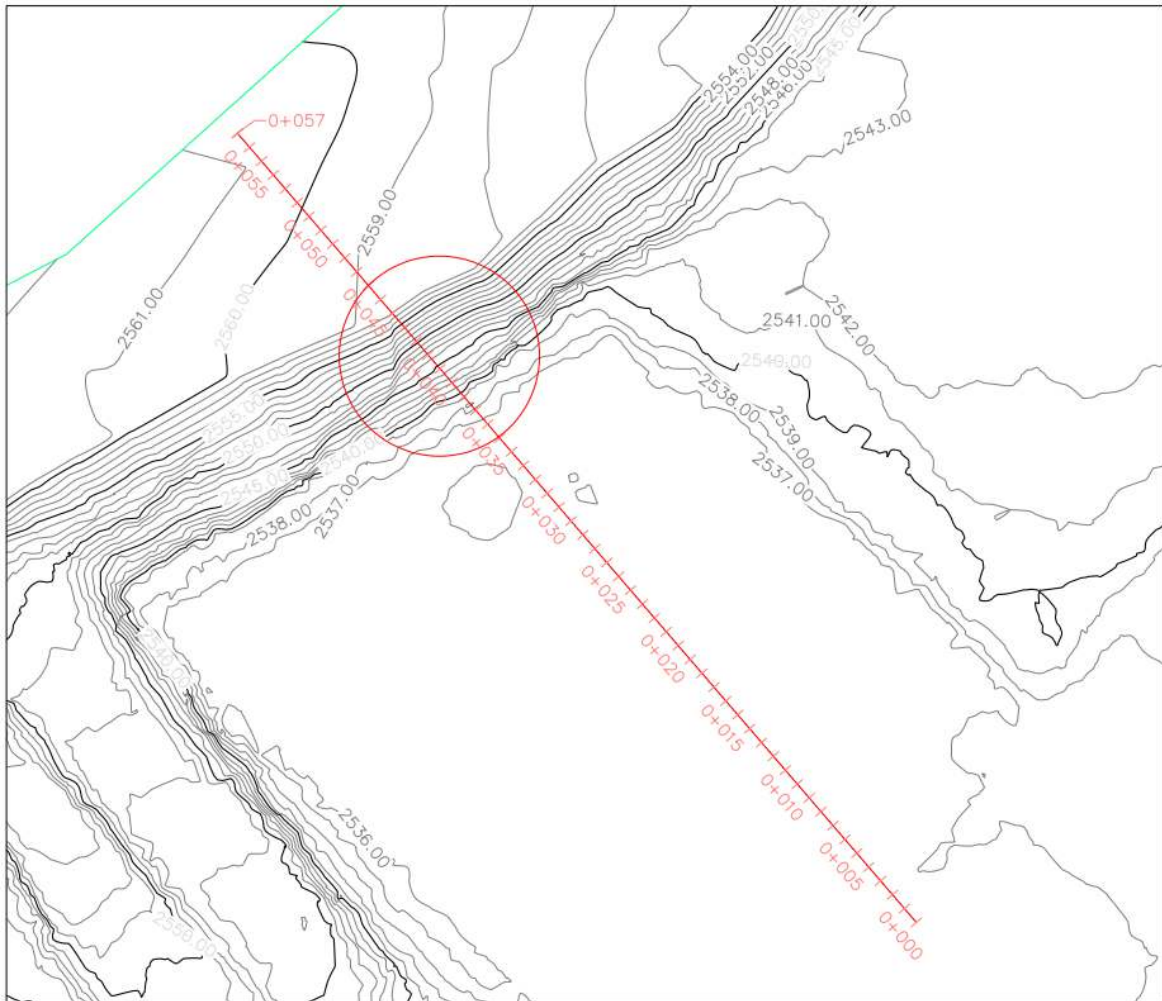
Modelo digital de elevaciones



Nota: En la parte derecha de la imagen, refleja la escala de colores con respecto a la altura.

Elaboración Propia.

Teniendo el modelo digital de elevaciones, se procedió a realizar las curvas de nivel del talud, como se aprecia en la Figura 18.

Figura 18*Curvas de nivel y progresivas del talud*

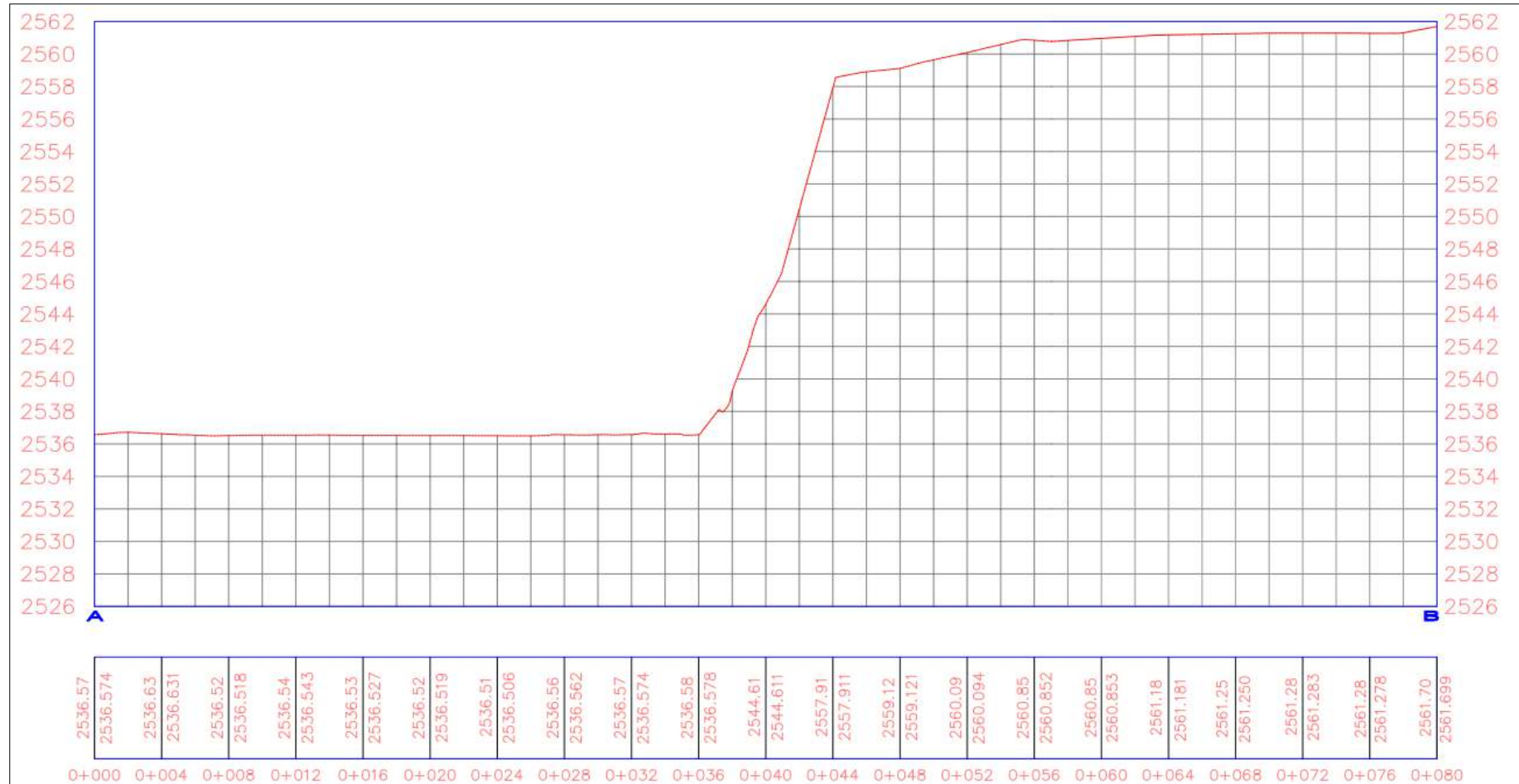
Nota. El círculo rojo refleja la zona de estudio. Elaboración propia.

La Figura 18 presenta las curvas de nivel y las progresivas del talud, que abarcan desde la progresiva 0+000 hasta la progresiva 0+055, delimitando el tramo en el cual se realizó el análisis detallado del talud. En esta representación se observa un cambio drástico de elevaciones entre las progresivas 0+035 y 0+045, destacándose como la zona más crítica del talud. Esta variación pronunciada en las elevaciones indica un incremento en la pendiente y, por ende, en el potencial de inestabilidad, lo cual es relevante para evaluar tanto el factor de seguridad como la probabilidad de falla en ese sector específico.

Se realizó el corte de las progresivas, que se exponen en la figura 19.

Figura 19

Corte de las progresivas del talud



Nota. Desde la cota 0+038 hasta la cota 0+044 está definido el cambio trástico de la pendiente del talud. Elaboración propia.

Desde la progresiva 0+036, con una cota de 2536.58 msnm, hasta la progresiva 0+044, a 2557.91 msnm, se delimita el talud en análisis. Este tramo presenta una altura total de 21.33 m y una pendiente de 69.44° respecto a la horizontal, equivalente a una relación de talud de 2.67:1. Para describir en detalle todas las características geométricas del talud, la Tabla 3 especifica las progresivas y sus respectivas cotas. Esta información es fundamental para comprender las características geométricas del talud y evaluar su estabilidad con precisión.

Tabla 3

Progresivas y elevaciones del talud

Progresiva	Elevación (msnm)
0+000	2536.57
0+002	2536.73
0+004	2536.63
0+006	2536.54
0+008	2536.52
0+010	2536.54
0+012	2536.54
0+014	2536.55
0+016	2536.53
0+018	2536.53
0+020	2536.52
0+022	2536.52
0+024	2536.51
0+026	2536.50
0+028	2536.56
0+030	2536.56
0+032	2536.57
0+034	2536.60
0+036	2536.58
0+038	2539.22
0+040	2544.61
0+042	2550.44
0+044	2557.91
0+046	2558.91
0+048	2559.12
0+050	2559.64
0+052	2560.09
0+054	2560.58
0+056	2560.85
0+058	2560.84

Progresiva	Elevación (msnm)
0+060	2560.85
0+062	2561.09
0+064	2561.18
0+066	2561.22
0+068	2561.25
0+070	2561.29
0+072	2561.28
0+074	2561.28
0+076	2561.28
0+078	2561.31
0+080	2561.70

Nota. Descripción de las características geométricas del talud. Elaboración propia.

Considerando el punto A de la Figura 19, para fines prácticos, el origen de coordenadas entonces se obtiene la Tabla 4.

Tabla 4

Coordenados transformadas de talud

Punto	Coordenadas iniciales (X)	Coordenadas iniciales (Z)	Coordenadas transformadas (X)	Coordenadas transformadas (Z)
A	0	2526.00	0.00	0.00
0+000	0	2536.57	0.00	10.57
0+002	2	2536.73	2.00	10.73
0+004	4	2536.63	4.00	10.63
0+006	6	2536.54	6.00	10.54
0+008	8	2536.52	8.00	10.52
0+010	10	2536.54	10.00	10.54
0+012	12	2536.54	12.00	10.54
0+014	14	2536.55	14.00	10.55
0+016	16	2536.53	16.00	10.53
0+018	18	2536.53	18.00	10.53
0+020	20	2536.52	20.00	10.52
0+022	22	2536.52	22.00	10.52
0+024	24	2536.51	24.00	10.51
0+026	26	2536.50	26.00	10.50
0+028	28	2536.56	28.00	10.56
0+030	30	2536.56	30.00	10.56
0+032	32	2536.57	32.00	10.57
0+034	34	2536.60	34.00	10.60
0+036	36	2536.58	36.00	10.58
0+038	38	2539.22	38.00	13.22
0+040	40	2544.61	40.00	18.61
0+042	42	2550.44	42.00	24.44

Punto	Coordenadas iniciales (X)	Coordenadas iniciales (Z)	Coordenadas transformadas (X)	Coordenadas transformadas (Z)
0+044	44	2557.91	44.00	31.91
0+046	46	2558.91	46.00	32.91
0+048	48	2559.12	48.00	33.12
0+050	50	2559.64	50.00	33.64
0+052	52	2560.09	52.00	34.09
0+054	54	2560.58	54.00	34.58
0+056	56	2560.85	56.00	34.85
0+058	58	2560.84	58.00	34.84
0+060	60	2560.85	60.00	34.85
0+062	62	2561.09	62.00	35.09
0+064	64	2561.18	64.00	35.18
0+066	66	2561.22	66.00	35.22
0+068	68	2561.25	68.00	35.25
0+070	70	2561.29	70.00	35.28
0+072	72	2561.28	72.00	35.28
0+074	74	2561.28	74.00	35.28
0+076	76	2561.28	76.00	35.28
0+078	78	2561.31	78.00	35.31
0+080	80	2561.70	80.00	35.70
B	80	2526.00	80.00	0.00

Nota. Descripción de las particularidades geométricas del talud. Elaboración propia.

5.2. Analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos del talud

Se realizó el análisis de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos de acuerdo con los indicadores (cohesión, peso específico y ángulo de fricción).

Para peso específico, la Tabla 5, muestra a detalle esta característica de cada muestra.

Tabla 5

Peso específico de las diferentes muestras

Muestra	Peso Específico (Kgf/m ³)
1	1830
2	1820
3	1860
4	1810
5	1840
6	1820
7	1860

Muestra	Peso Específico (Kgf/m ³)
8	1820
9	1820
10	1800

Nota. Peso específico mínimo de 1800 kgf/m³ y máximo de 1860 kgf/m³. Elaboración propia.

Considerando las muestras se procedió a determinar la tabla de frecuencias, que se observa en la Tabla 6.

Tabla 6

Tabla de frecuencia del peso específico

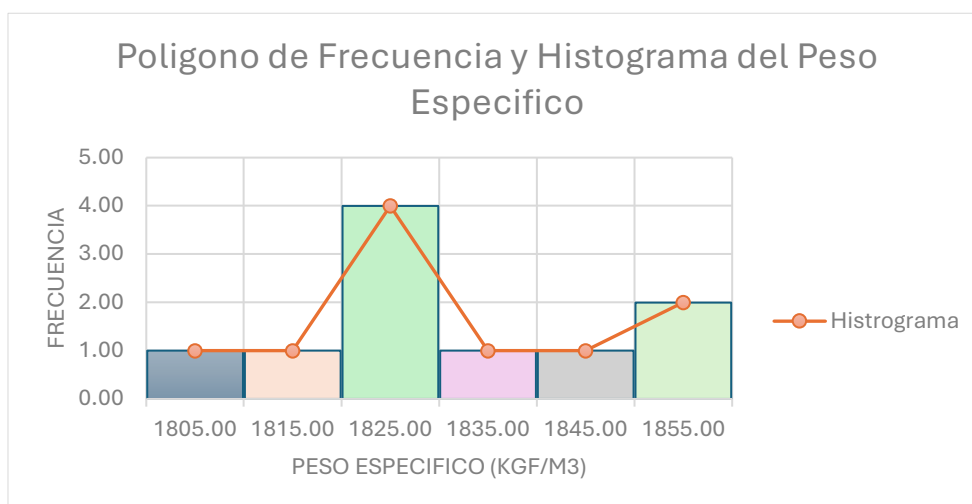
Li (kgf/m ³)	Ls (kgf/m ³)	xi (kgf/m ³)	fi
1800.00	1810.00	1805	1
1810.00	1820.00	1815	1
1820.00	1830.00	1825	4
1830.00	1840.00	1835	1
1840.00	1850.00	1845	1
1850.00	1860.00	1855	2

Nota. La moda se encuentra entre 1820 kgf/m³ y 1830kgf/m³. Elaboración propia.

En la Figura 20, se muestra el histograma y el polígono de frecuencia donde su incertidumbre del peso específico se ajusta a una distribución normal.

Figura 20

Polígono de frecuencia e histograma del peso específico



Nota. La distribución del peso específico se ajusta a una distribución normal. Elaboración propia.

Se determinó la media y la desviación estándar para la distribución probabilística normal, la Tabla 7 muestra los pasos para obtener estos valores.

Tabla 7

Media y desviación estándar del peso específico

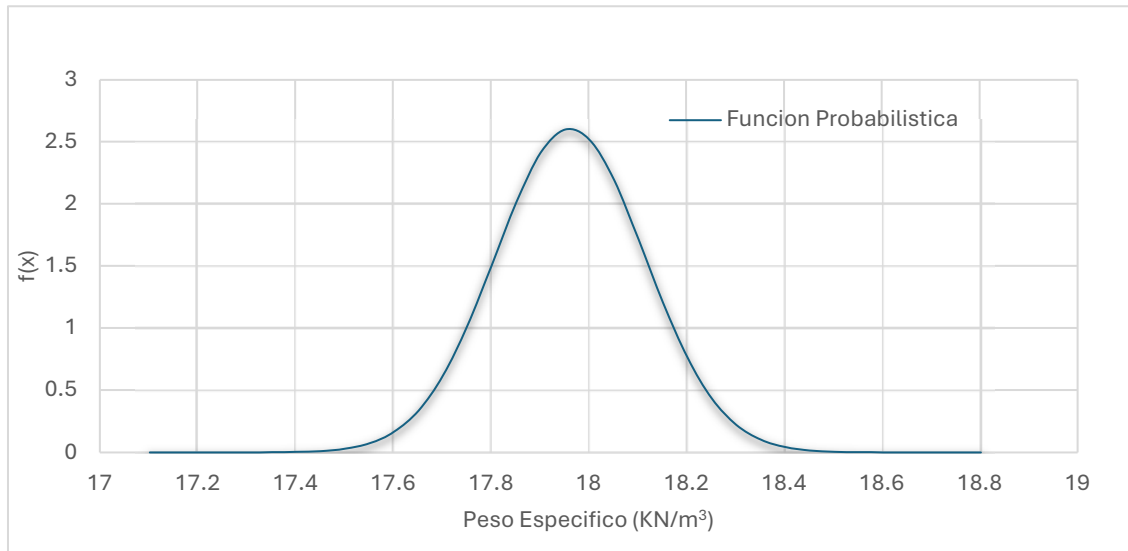
Li (kgf/m ³)	Ls (kgf/m ³)	xi (kgf/m ³)	fi	xi*fi	(μ-xi) ²	fi*(μ-xi) ²	
1800.00	1810.00	1805.00	1.00	1805.00	676.00	676.00	
1810.00	1820.00	1815.00	1.00	1815.00	256.00	256.00	
1820.00	1830.00	1825.00	4.00	7300.00	36.00	144.00	
1830.00	1840.00	1835.00	1.00	1835.00	16.00	16.00	
1840.00	1850.00	1845.00	1.00	1845.00	196.00	196.00	
1850.00	1860.00	1855.00	2.00	3710.00	576.00	1152.00	
				μ(kgf/m ³)=	1831	σ ² =	244.00
						σ(kgf/m ³)=	15.62

Nota. La media y la desviación estándar del peso específico es de 1831kg/m³ y 15.62kg/m³ respectivamente. Elaboración propia.

La media es de 1831.00kgf/m³ o su equivalente 17.96KN/m³ y su desviación estándar es de 15.62 kgf/m³ o su equivalente 0.15KN/m³ se obtuvieron la distribución probabilística normal de la incertidumbre del peso específico, que se muestra a continuación:

$$f(x) = \frac{1}{0.15\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-17.96)^2}{2(0.15^2)}}$$

La Figura 21 se observa la función de la distribución probabilística normal de la incertidumbre del peso específico con una media de 17.96KN/m³ y una desviación estándar de 0.15KN/m³.

Figura 21*Incertidumbre del peso específico*

Nota. Distribución Normal de $\mu=17.96\text{KN/m}^3$ y $\sigma=0.15\text{KN/m}^3$. Elaboración propia.

De la misma forma se analizó los resultados de la incertidumbre del ángulo de fricción del estrato del talud.

La tabla 8 se observa los resultados del ángulo de fricción de las diferentes muestras que se obtuvieron.

Tabla 8*Ángulo de fricción de las diferentes muestras*

Muestra	Angulo de fricción (°)
1	32.38
2	33.39
3	34.82
4	33.81
5	33.09
6	33.11
7	33.91
8	33.77
9	34.00
10	33.54

Nota. El ángulo de fricción mínimo es de 32.38° y máximo es de 34.82° . Elaboración propia.

La Tabla 9, se observa la tabla de frecuencia que presenta el ángulo de fricción.

Tabla 9

Tabla de frecuencia del ángulo de fricción

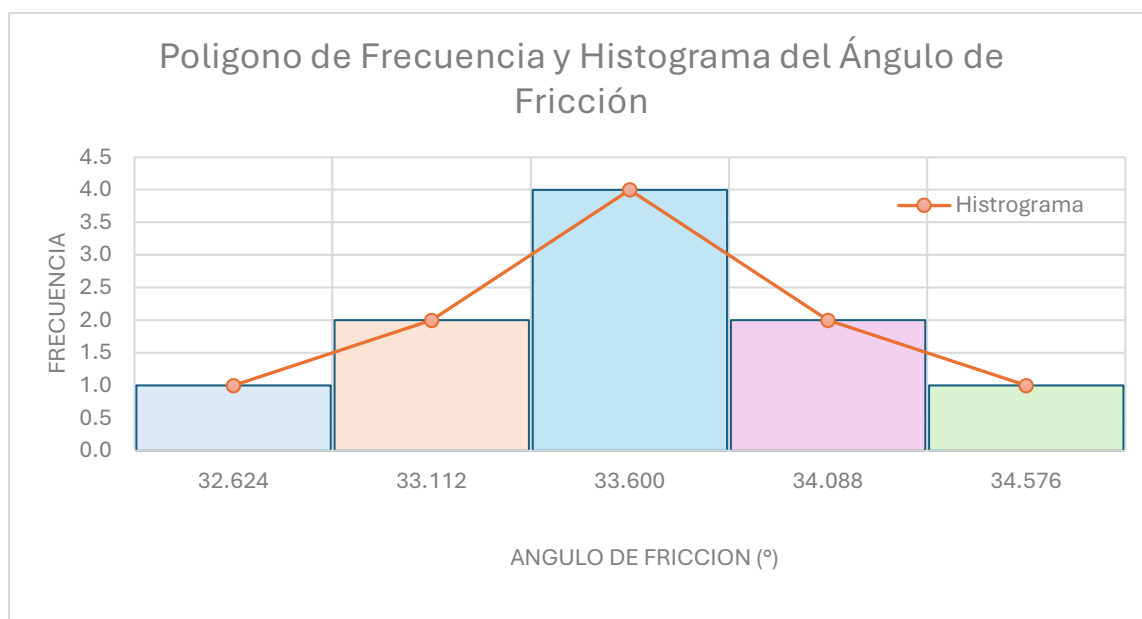
Li (°)	Ls (°)	xi (°)	fi
32.380	32.868	32.624	1
32.868	33.356	33.112	2
33.356	33.844	33.600	4
33.844	34.332	34.088	2
34.332	34.820	34.576	1

Nota. La moda del ángulo de fricción esta entre 33.356° y 33.844°. Elaboración propia.

La Figura 22, se ve el histograma y el polígono de frecuencias de la incertidumbre del ángulo de fricción, donde se ajusta a una distribución normal.

Figura 22

Histograma y polígono de frecuencia del ángulo de fricción



Nota. La distribución del ángulo de fricción se ajusta a una distribución normal. Elaboración propia.

Teniendo la incertidumbre del ángulo de fricción se comporta como una función probabilística normal, la Tabla 10, se muestra el proceso para determinar la media y desviación estándar de este parámetro.

Tabla 10*Media y desviación estándar del ángulo de fricción*

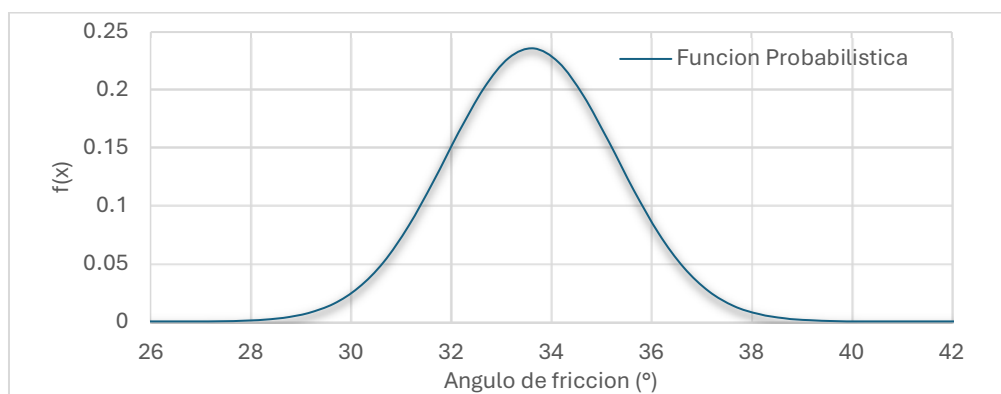
Li (°)	Ls (°)	xi (°)	fi	xi*fi	(μ-xi)^2	fi*(μ-xi)^2
32.380	32.868	32.624	1	32.624	0.953	0.953
32.868	33.356	33.112	2	66.224	0.238	0.476
33.356	33.844	33.600	4	134.400	0.000	0.000
33.844	34.332	34.088	2	68.176	0.238	0.476
34.332	34.820	34.576	1	34.576	0.953	0.953
			μ(°)=	33.60	σ²=	2.86
					σ(°)=	1.69

Nota. La media y desviación estándar del ángulo de fricción es de 33.60° y 1.69° respectivamente. Elaboración propia.

La Tabla 10, se observa el cálculo de la media del ángulo de fricción y su desviación estándar que son de 33.60° y 1.69° respectivamente, entonces, la función probabilística normal que describe la incertidumbre del ángulo de fricción del estrato del talud es:

$$f(x) = \frac{1}{1.69\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-33.60)^2}{2(1.69^2)}}$$

La Figura 23 se muestra la función probabilística normal de la incertidumbre del ángulo de fricción, con una media de 33.60° y su desviación estándar de 1.69°.

Figura 23*Incetidumbre del ángulo de fricción*

Nota. Distribución normal de $\mu=33.60^\circ$ y $\sigma=1.69^\circ$. Elaboración propia.

Por último, se analizó la incertidumbre de la cohesión del suelo presente en el talud, la Tabla 11 muestra la cohesión de los diferentes especímenes.

Tabla 11*Cohesión de las diferentes muestras*

Muestra	Cohesión (kgf/cm²)
1	0.34
2	0.34
3	0.33
4	0.34
5	0.34
6	0.38
7	0.35
8	0.35
9	0.34
10	0.36

Nota. La cohesión mínima es de 0.33kgf/cm² y máxima es de 0.38kgf/cm². Elaboración propia.

A partir de estos datos, se obtuvo la tabla de frecuencia que presenta la cohesión del estrado del talud analizado.

Tabla 12*Tabla de frecuencia de la cohesión*

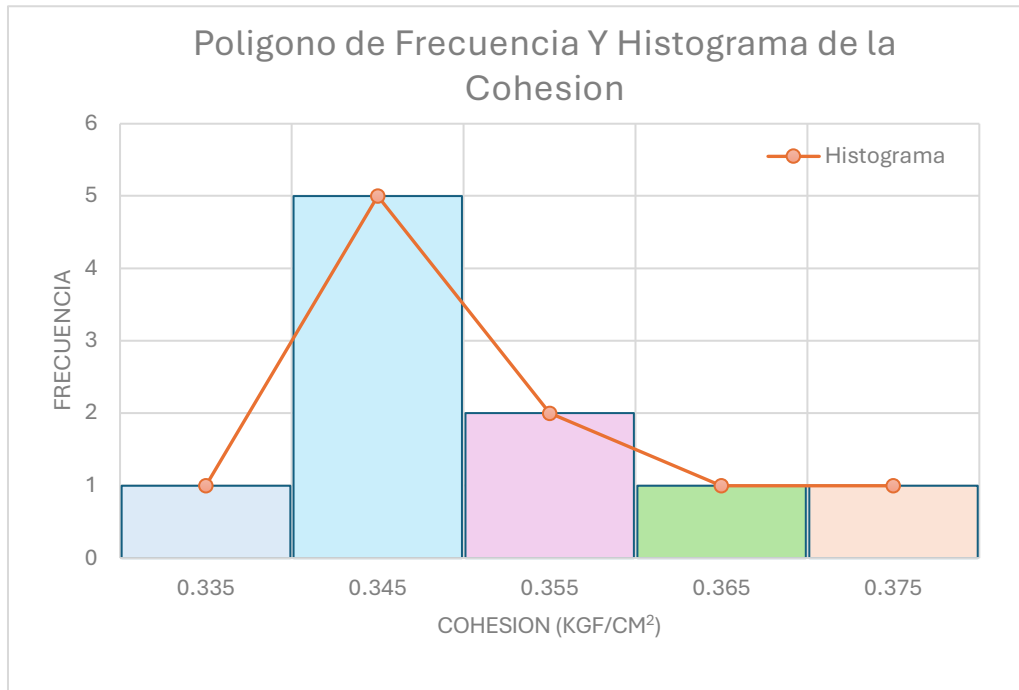
Li (kgf/cm²)	Ls (Kgf/cm²)	xi (kgf/cm²)	fi
0.330	0.340	0.335	1
0.340	0.350	0.345	5
0.350	0.360	0.355	2
0.360	0.370	0.365	1
0.370	0.380	0.375	1

Nota. La moda de la cohesión está entre 0.34kgf/cm² y 0.35kgf/cm². Elaboración propia.

Realizando el histograma y el polígono de frecuencia que presenta la cohesión producto de las muestras, se representa en la Figura 24.

Figura 24

Histograma y polígono de frecuencia de la cohesión



Nota. La distribución de la cohesión se ajusta a una distribución gamma. Elaboración propia.

La Figura 24, representa el comportamiento de la incertidumbre de la cohesión del estrato del talud, entonces, la función probabilística que más se ajusta a dicha incertidumbre es la función de distribución gamma.

Para determinar la función probabilística de distribución gamma, es necesario conocer dos factores α y β , donde estos factores dependen de la media y desviación estándar del comportamiento de la cohesión.

La Tabla 13, muestra el cálculo de la media (μ) y desviación estándar (σ) de la cohesión. Donde la media es de 0.351kg/cm^2 o su equivalente 34.42kPa de la misma forma la desviación estándar de este parámetro es 0.035kg/cm^2 o su equivalente 3.45kPa .

Tabla 13*Media y desviación estándar de la cohesión*

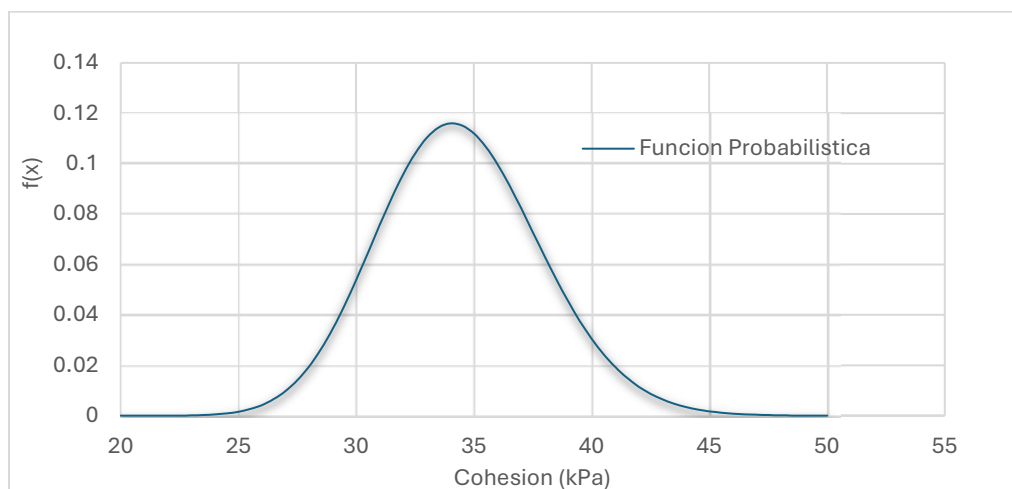
Li (kgf/cm ²)	Ls (Kgf/cm ²)	xi (kgf/cm ²)	fi	xi*fi	(μ-xi)^2	fi*(μ-xi)^2
0.330	0.340	0.335	1	0.335	0.00026	0.000256
0.340	0.350	0.345	5	1.725	0.00004	0.000180
0.350	0.360	0.355	2	0.71	0.00002	0.000032
0.360	0.370	0.365	1	0.365	0.00020	0.000196
0.370	0.380	0.375	1	0.375	0.00058	0.000576
				μ(kgf/cm ²)=	0.351	σ ² = 0.00124
						σ(kgf/cm ²)= 0.035

Nota. La media y desviación estándar de la cohesión son 0.351kgf/cm² y 0.035kgf/cm² respectivamente. Elaboración propia.

Aplicando la ecuación (41) y (42) de la distribución gamma los valores de α y β son 99.35555 y 0.346446 respectivamente. Entonces, la función de distribución gamma esta dado por:

$$f(x) = \frac{1}{0.346446^{99.35555} \left[\int_0^{\infty} x^{99.35555-1} e^{-x/0.346446} dx \right]} x^{99.35555-1} e^{-x/0.346446}$$

La Figura 25 representa la función gamma donde su media es 34.42kPa y su desviación estándar es 3.45kPa producto de la incertidumbre de la cohesión que presenta el estrato del talud.

Figura 25*Incertidumbre de la cohesión*

Nota. Distribución Gamma $\mu=34.42$ kPa y $\sigma =3.45$ kPa. Elaboración propia.

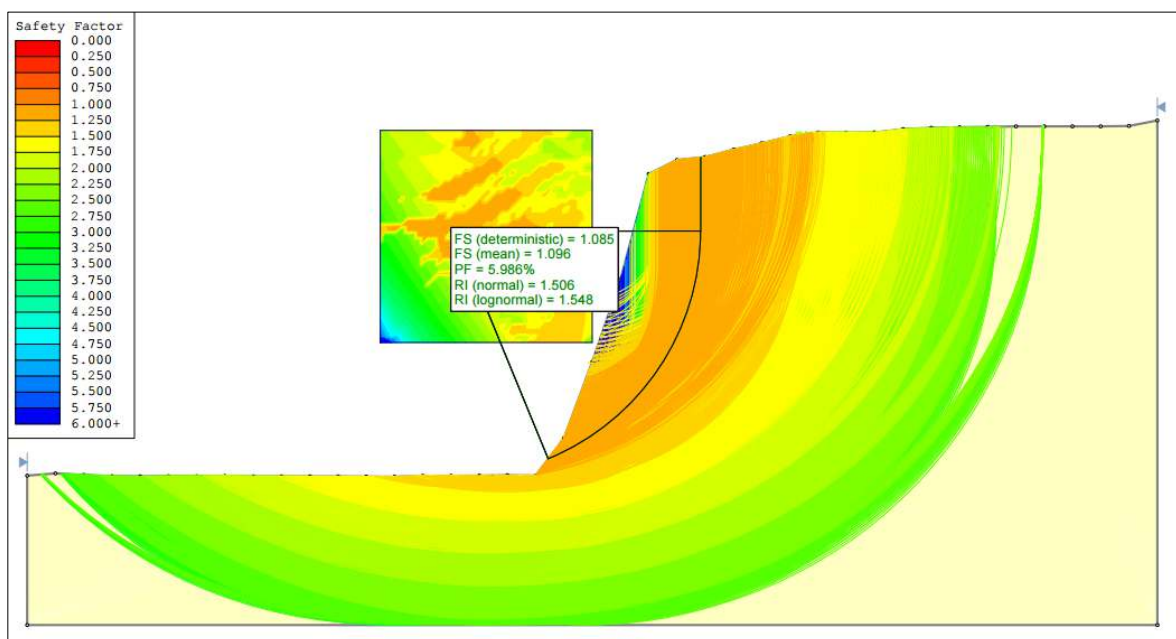
5.3. Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud producto de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos

Para conseguir el factor de seguridad media y probabilidad de falla, se utilizó el método Spencer y la simulación Monte Carlo. Teniendo la distribución probabilística, la media y desviación estándar de los parámetros geotécnicos del talud descrito en los apartados anteriores, se realizó el cálculo en el software Slide2.

Los factores de seguridad están variando desde 0.8 a 6 como se puede observar en la Figura 26. Las curvas de nivel con la degradación de colores representan de como varia el factor de seguridad, siendo los más críticos el de color naranja y es de 1.085. También se representa el factor de seguridad media que es 1.096 y su probabilidad de falla del talud siendo 5.986%.

Figura 26

Factor de seguridad media y probabilidad de falla del talud



Nota. Factor de seguridad media de 1.085 y la probabilidad de falla del talud es de 5.986%.

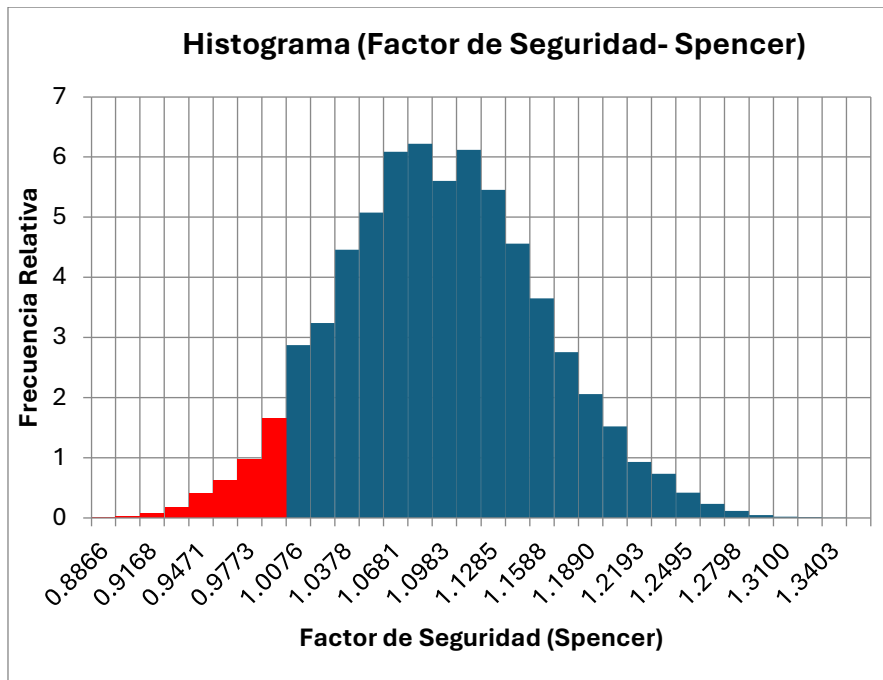
Elaboración propia.

La Figura 27, se muestra el histograma de cómo ha variado el factor de seguridad según los valores aleatorios tomados de la incertidumbre de los parámetros geotécnicos,

siendo el factor de seguridad media de 1.096, su desviación estándar es de 0.06346, su valor máximo del factor de seguridad es 1.338 y su mínimo valor es de 0.8845. Las barras de color rojo representan los factores de seguridades menores a 1, siendo un porcentaje de 5.986% que representa la probabilidad de falla del talud.

Figura 27

Histograma relativa del factor de seguridad por el método Spencer



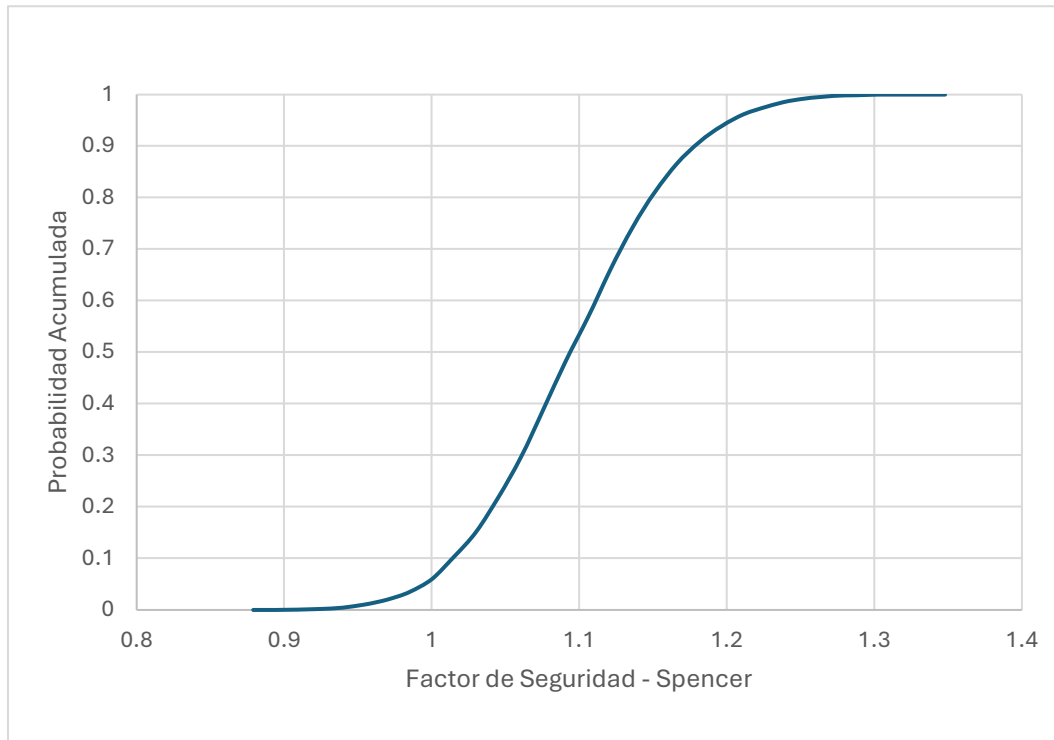
Nota. El área de las barras de color rojo es la probabilidad de falla del talud siendo 5.986%.

Elaboración propia.

La Figura 28, representa la probabilidad acumulada respecto al factor de seguridad dado por el método Spencer, los factores de seguridad menores a 1 representa una línea casi horizontal demostrando así que la probabilidad de falla del talud es 5.986%.

Figura 28

Probabilidad de falla acumulada respecto al factor de seguridad por el método Spencer

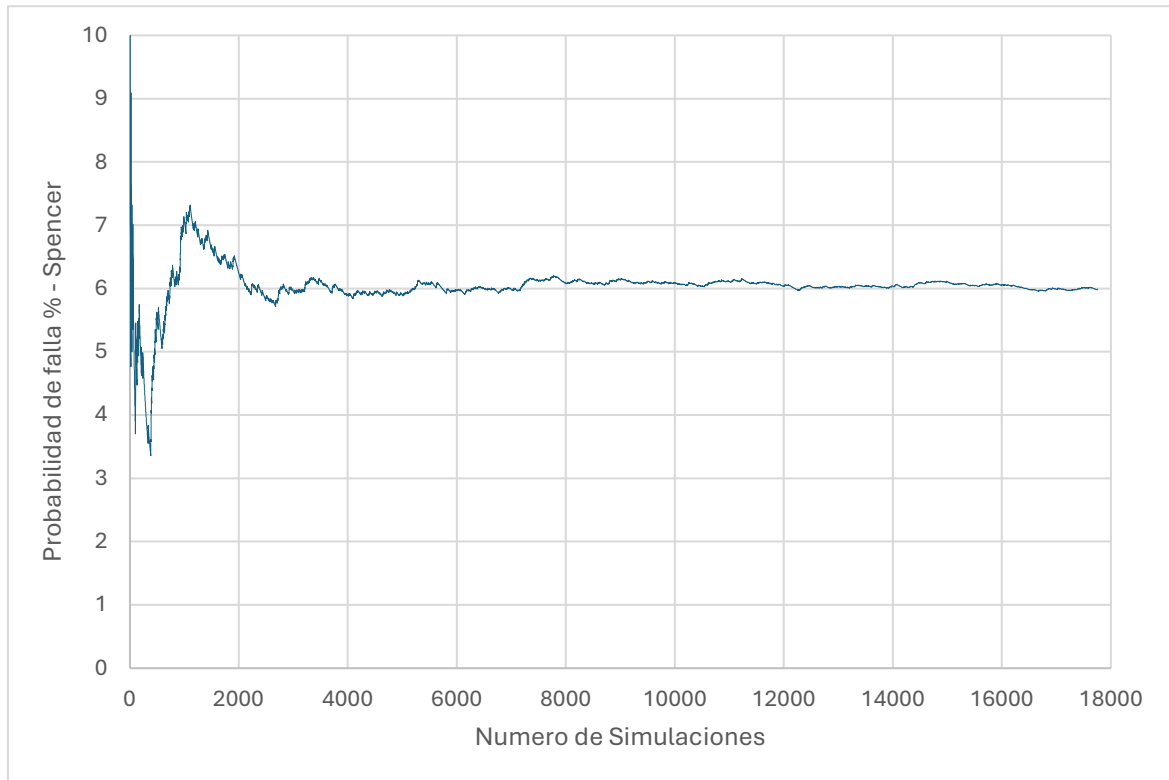


Nota. Curva S del factor de seguridad (Spencer) y la probabilidad acumulada. Elaboración propia.

La Figura 29, muestra de 0 a 4000 simulaciones una variación drástica de la probabilidad de falla, luego de las 4000 simulaciones la función converge al valor de 5.986%, esto representa como la simulación Monte Carlo se aplica para determinar la probabilidad de falla de talud.

Figura 29

Simulación Monte Carlo para la probabilidad de falla del talud

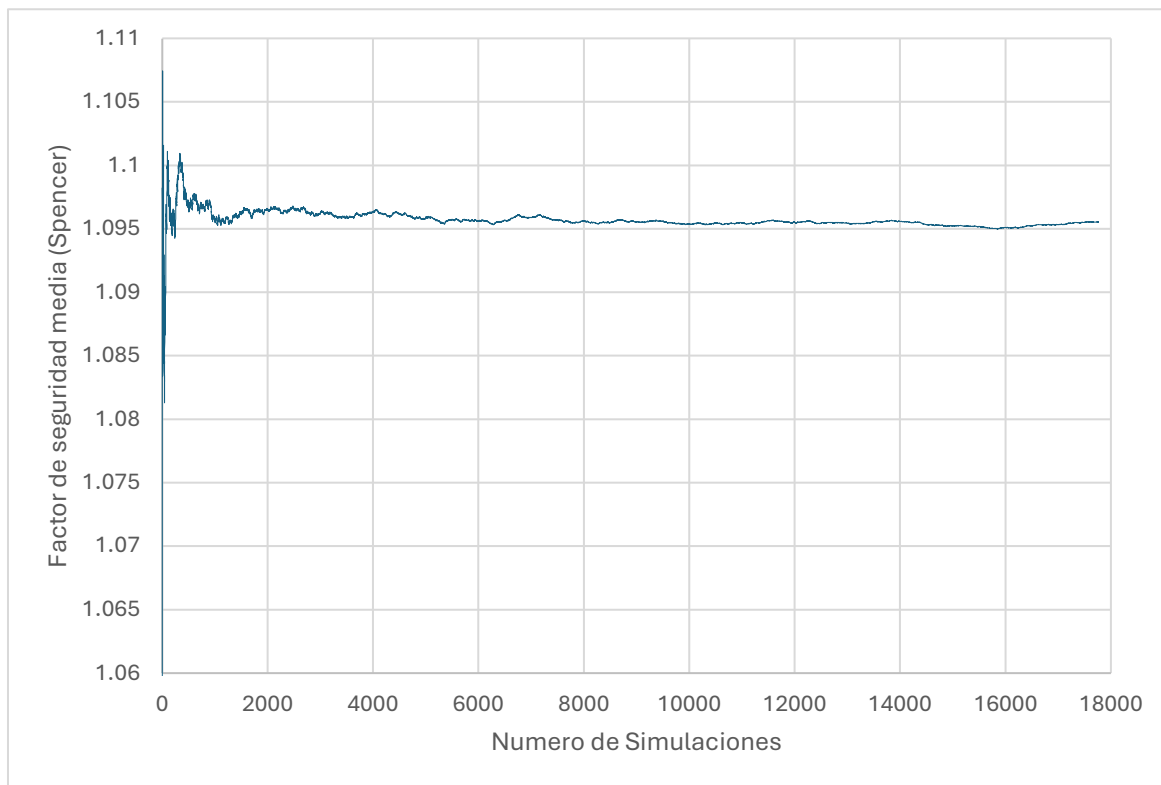


Nota. Desde la simulación 4000 la función converge a 5.986% siendo este la probabilidad de falla del talud. Elaboración propia.

La Figura 30, se aprecia la aplicación de la simulación de Monte Carlo para obtener el factor de seguridad media, y como se puede observar de 0 a 2000 simulaciones el factor de seguridad presenta mucha variación respecto a la simulación anterior o posterior, es así que, después de la simulación 2000 la función empieza a converger a 1.096, siendo este el factor de seguridad media.

Figura 30

Simulación Monte Carlo para el factor de seguridad media del talud



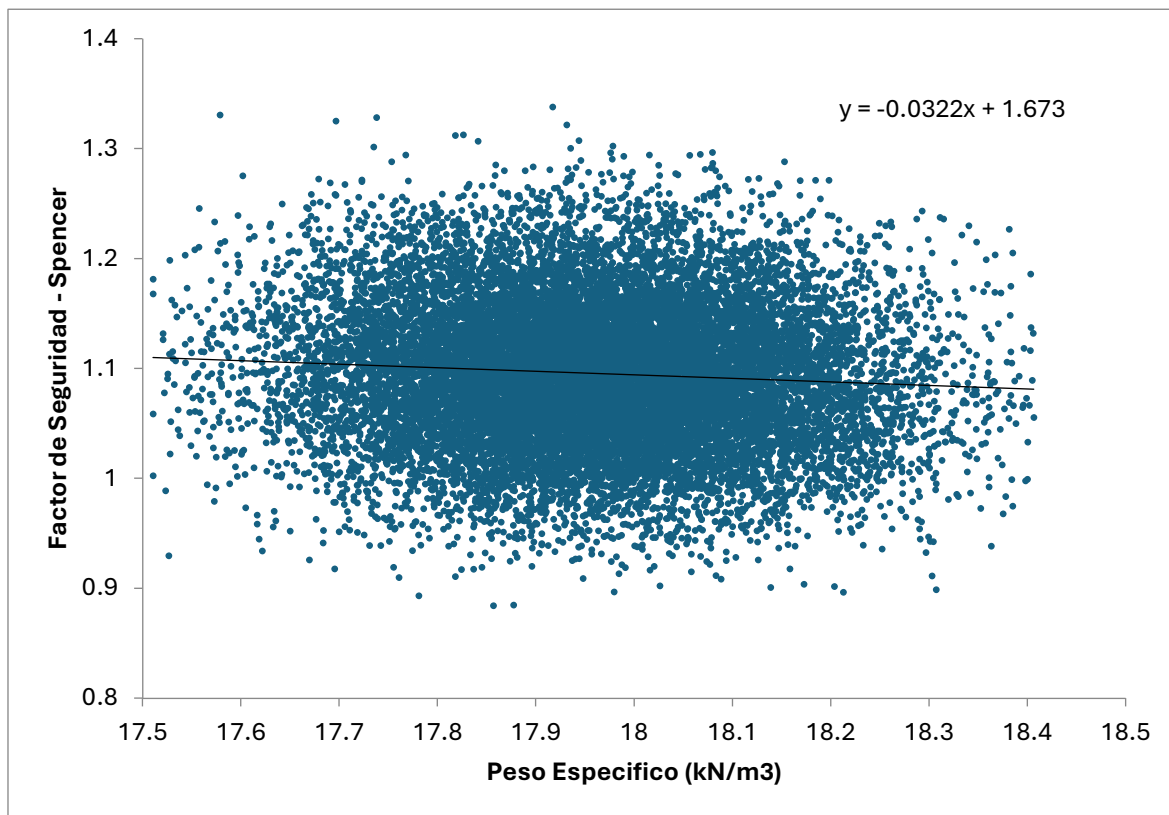
Nota. Desde la simulación 2000 la función converge a 1.096 siendo este el factor de seguridad media de talud. Elaboración propia.

Para poder entender la relación entre las variables independiente y dependiente para este caso en particular es necesario relacionar el factor de seguridad con la incertidumbre de los parámetros geotécnicos (peso específico, cohesión y ángulo de fricción).

La Figura 31 muestra la nube de puntos relacionando el peso específico con el factor de seguridad. Haciendo una regresión lineal de ambas variables se puede observar que el factor de seguridad disminuye a razón de 0.0322 mientras se incrementa el Peso Específico (kN/m^3). Dado estos datos el coeficiente de correlación es de 0.0753, como dicho coeficiente está entre 0 y 1, entonces se puede definir que existe una correlación positiva o directa entre ambas variables.

Figura 31

Dispersión del peso específico vs factor de seguridad (Spencer)



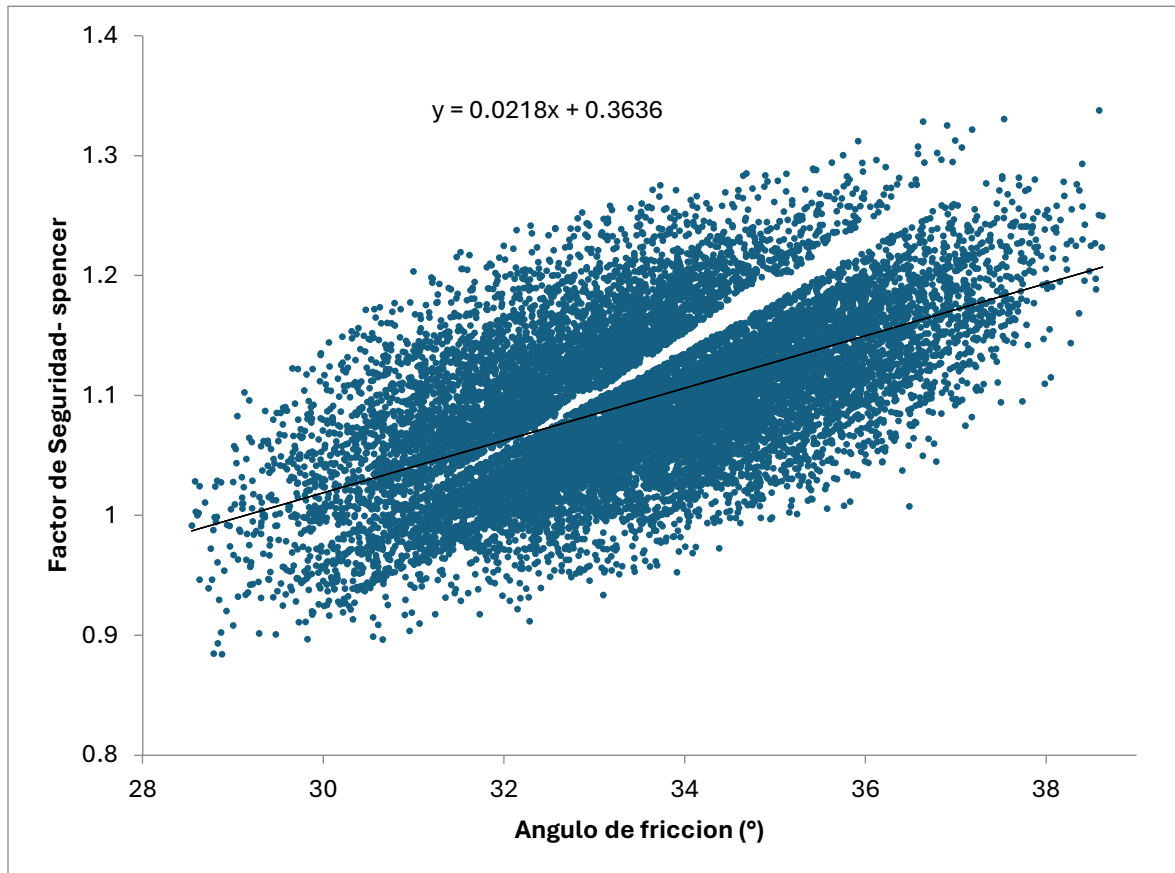
Nota. El factor de seguridad decrece a razón de 0.0322 con relación al peso específico.

Elaboración propia.

En la Figura 32, presenta la dispersión de existente entre el ángulo de fricción y el factor de seguridad (Spencer). Al realizar una regresión lineal entre ambas variables, se observa que factor de seguridad se incrementa a razón de 0.0218 con relación al incremento del ángulo de fricción. Además, para ambas variables el coeficiente de correlación es 0.580169, como se encuentra entre 0 y 1, entonces ambas variables presentan un correlación positiva o directa.

Figura 32

Dispersión del ángulo de fricción vs factor de seguridad (Spencer)



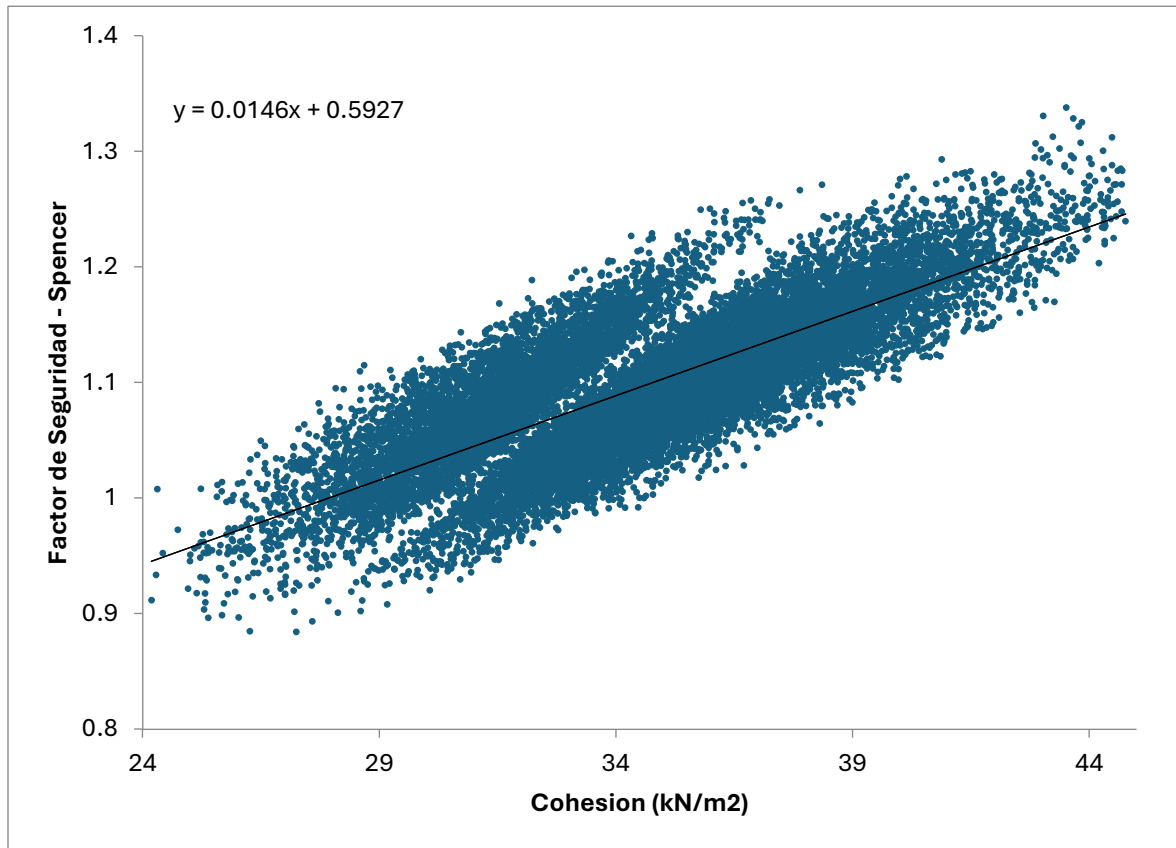
Nota. El factor de seguridad crece a razón de 0.0218 con relación al alguno de fricción.

Elaboración propia.

La Figura 33 presenta la dispersión entre la cohesión y el factor de seguridad (Spencer), realizando una regresión lineal se observa que el incremento del factor de seguridad es proporcional al incremento de la cohesión en 0.0146. De la misma forma el coeficiente de correlación entre ambas variables es 0.787793 siendo este valor entre 0 y 1 y existiendo una correlación directa o positiva entre la cohesión y el factor de seguridad.

Figura 33

Dispersión de la cohesión vs factor de seguridad (Spencer)



Nota. El factor de seguridad se incrementa razón de 0.0146 con respecto a la cohesión.

Elaboración propia.

VI. Conclusiones

Las características geométricas del talud están descritas por una altura de 21.33m, con una pendiente de 69.44° con respecto a la horizontal, el pie y la cresta del del talud tiene una pendiente de 0° y 5.10° respectivamente en relación con la horizontal. Además del mismo modo las características geométricas del talud están descritas en la Tabla 4.

Al analizar la incertidumbre de los parámetros geotécnicos se obtuvieron los siguientes valores; para el peso específico una función probabilística normal con una media de 17.96KN/m^3 y una desviación estándar de 0.15KN/m^3 . Para el ángulo de fricción la incertidumbre queda descrito por una función probabilística normal con una media de 33.60° y una desviación estándar de 1.69° . La incertidumbre de la cohesión está siendo descrita por una función probabilística gamma cuya media es de 34.42KN/m^2 y una desviación estándar de 3.45KN/m^2 .

El valor determinado para el factor de seguridad media fue de 1.096 cuyo valor es mayor a 1, definiendo como un talud estable; y el valor determinado para la probabilidad de falla del talud fue de 5.986% siendo este muy significativo para la estabilidad del talud. El coeficiente de correlación entre el factor de seguridad con el peso específico es de 0.0753 donde existe una correlación directa. De la misma manera el coeficiente de correlación entre el factor de seguridad y el ángulo de fricción es 0.580169 donde se expone que existe una correlación directa o positiva. Por último, la correlación entre el factor de seguridad y la cohesión es de 0.787793 siendo una correlación directa o positiva.

VII. Recomendaciones

Para garantizar la seguridad de la edificación existente ubicada en el pie del talud, así como la integridad de los vecinos de la zona, se recomienda llevar a cabo un proceso de perfilado. Esta acción, realizada en coordinación con los propietarios y la comunidad, permitirá incrementar el factor de seguridad promedio y reducir significativamente la probabilidad de falla del talud.

Para futuras investigaciones relacionadas con la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, se recomienda aumentar la cantidad de muestras recolectadas y analizadas. Este enfoque permitirá obtener una descripción más representativa y precisa de las propiedades del suelo, reduciendo las incertidumbres inherentes al análisis y mejorando la confiabilidad de los resultados.

Para futuras investigaciones relacionadas con la probabilidad de falla de taludes, se recomienda ampliar el enfoque analítico, incorporando no solo la incertidumbre de los parámetros geotécnicos, sino también los efectos de variables meteorológicas y sísmicas. Esta integración permitirá desarrollar estudios más robustos y holísticos, mejorando la comprensión de los factores que contribuyen a la inestabilidad de los taludes y facilitando la toma de decisiones más acertadas por parte de los ingenieros. Por último, se recomienda para futuras investigaciones analizar con modelos tridimensionales basados en el método de elementos finitos.

VIII. Referencias

- Altamirano Albuja, D. C., y Gozzer Pelaez, Y. M. (2021). *Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad del talud de la Subestación Eléctrica Colcabamba [Tesis para optar el grado de Ingeniero, Universidad Ricardo Palma]*. Repositorio Institucional. Obtenido de hdl.handle.net/20.500.14138/4682
- Arias Gonzales, J. L. (2020). *Proyecto de tesis: Guía para la elaboración*. Arequipa: ISBN: 978-612-00-5416-1.
- Assis, A. (2002). *MÉTODOS ESTADÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS EM GEOTECNIA*. Brasília: APOSTILA.
- Barboza Núñez, H., y Zambrano Chilón, W. J. (2021). *Análisis comparativo de la aplicación de los métodos Bishop simplificado y Morgenstern-Price para la determinación de la estabilidad de taludes [Tesis para optar el grado de Ingeniero, Universidad Privada del Norte]*. Repositorio Institucional. Obtenido de hdl.handle.net/11537/27636
- Bernal, C. A. (2010). *Metodología de la investigación*. Chía : PEARSON.
- Braja, D. M. (2015). *Fundamento de la ingeniería geotécnica*. Mexico : CENGAGE Learning.
- Bravo Oscco, P. (2020). *Análisis estratégico y evaluación, “estabilidad de taludes del Caccañan” distrito Tambobamba, provincia de Cotabambas - región Apurímac periodo 2019 [Tesis para optar el grado de Maestro, Universidad Nacional san Antonio Abad del Cusco]*. Repositorio Institucional. Obtenido de hdl.handle.net/20.500.12918/5737
- Cruz Zelaya , L. J. (2012). *Análisis Probabilístico de Fallas Superficiales en Taludes Debido a Procesos de Infiltración [Trabajo para obatar el grado de Maestro, Pontificia*

Universidad Javerana]. Repositorio Institucional, Bogotá D.C. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10554/2524>

Durand Salas, C. G., y Ramos Arias, A. A. (2022). *Análisis probabilístico y determinístico para la estabilidad de taludes en suelos arenosos del sector Lomo de Corvina-Villa el Salvador [Tesis para optar el título de Ingeniero, Universidad Ricardo Palma]*. Repositorio Institucional. Obtenido de hdl.handle.net/20.500.14138/5893

Elías, M. M. (2005). *Técnicas e Instrumentos de Investigación*. Lima: Editorial de la UNMSM.

Fernandez Novoa , W. E. (2018). *Evaluación Probabilística de la estabilidad de taludes en suelo residual de roca granítica mediante la simulación de Monte Carlo [Tesis para optar el título de Ingeniero, Universidad Católica de la Santísima Concepción]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositoriodigital.ucsc.cl/handle/25022009/1430>

Griffiths , D., y Fenton, G. A. (2007). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering* . Halifax: SpringerWienNewYork.

IBM. (30 de Octubre de 2023). *IBM*. Obtenido de ¿Que es la simulación Montecarlo?: <https://www.ibm.com/es-es/topics/monte-carlo-simulation>

IGME. (1986). *Manual de taludes*. Madrid: EPTISA.

INDECI. (11 de julio de 2022). *COMPENDIO ESTADÍSTICO - GESTIÓN REACTIVA 2022*. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3889167/Compendio%20web%20comprimido-2022.pdf.pdf?v=1669820084>

Juárez Badillo, E., y Rico Rodriguez, A. (2005). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Mexico: LIMUSA .

Juárez Badillo, E., y Rico Rodríguez, A. (1973). *Mecánica de suelos*. Mexico: Limusa.

- Laboratorio de Suelos y Concreto CONCHIPA E.I.R.L. . (2022). *Estudio Mecánico de Suelo con fines de Cimentación* . Abancay.
- Medina Núñez, L. E. (2020). *Estabilización de taludes de gran altura analizados mediante métodos de equilibrio límite, carretera Taquebamba - San Mateo, Aymaraes, Apurímac 2020 [Tesis para obtener el grado de Ingeniero, Universidad Cesar Vallejo]*. Repositorio Institucional. Obtenido de hdl.handle.net/20.500.12692/57421
- Mendenhall, W., Beaver, R. J., y Beaver, B. M. (2010). *Introducción a la Probabilidad y Estadística* . Cruz Manca: CENGAGE Learning .
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento . (2017). *CE.020 Estabilización de suelos y taludes* . Lima: Diario Oficial el Peruano .
- Niño Montes, J. J. (2017). *Análisis probabilístico para el diseño de taludes en explotación minera a cielo abierto [Tesis para optar el grado de maestro, Universidad Nacional de Colombia]*. Repositorio Institucional. Obtenido de repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60957
- Prado González, A. A., Aguilar Guevara, J. R., y Cruz Talavera, R. J. (2020). *Análisis de estabilidad de talud de la carretera Nic.7 en el km 176, municipio de Santo Tomas, del departamento de Chontales [Tesis para optar el título de Ingeniero, Universidad Autónoma de Nicaragua, Managua]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.unan.edu.ni/id/eprint/12506>
- Torres Muñoz, M. (2004). *La Investigación Científica: Como Abordarla*. Chihuahua: ResearchGate.
- TWINKL. (20 de Enero de 2022). *¿Qué son las figuras geométricas?* Recuperado el 15 de Marzo de 2024, de twinkl: <https://www.twinkl.com.pe/>
- Vanmarcke, E. (1997). *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. Logan: Workshop.

IX. Anexos

Los anexos, panel fotográfico y otros documentos están resguardados en la oficina de repositorio digital institucional en la Biblioteca Central de la Universidad Tecnológica de los Andes