



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Análisis cinemático y probabilístico para evaluar el desprendimiento de
caída de rocas en taludes

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Garcia Burgos, Jeanpierre Harold
ORCID: 0009-0003-4399-915X

Yalan Novoa, Jose Fernando
ORCID:0009-0009-6107-4218

ASESOR

Torres Chung, Cesar Roberto
ORCID:0000-0002-3212-2817

Lima – Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de los autores

Garcia Burgos, Jeanpierre Harold

DNI: 71718501

Yalan Novoa, Jose Fernando

DNI: 74133161

Datos de asesor

Torres Chung, Cesar Roberto

DNI: 41182279

Datos del jurado

JURADO 1

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0003-2527-3665

JURADO 2

Chavarría Reyes, Liliana Janeth

DNI: 25481792

ORCID: 0000-0002-1759-2132

JURADO 3

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Jeanpierre Harold Garcia Burgos, con código de estudiante N° 201410718, con DNI N° 71718501, con domicilio en Coronel Lorenzo Iglesias Mz D5 Lt 19, distrito Santiago de Surco, provincia y departamento de Lima, y, Jose Fernando Yalan Novoa, con código de estudiante N° 201611152, con DNI N° 74133161, con domicilio en Urbanización Villa Universitaria Mz C Lt 23, distrito San Martín de Porres, provincia y departamento de Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

La presente tesis titulada: “ Análisis cinemático y probabilístico para evaluar el desprendimiento de caída de rocas en taludes ” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente Cesar Roberto Torres Chung, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 20% de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumo responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro del(la) (tesis/ trabajo de suficiencia profesional/ proyecto de investigación) es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en el(la) (tesis/ trabajo de suficiencia profesional/ proyecto de investigación) y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 23 de octubre de 2023



Jeanpierre Harold Garcia Burgos
DNI N° 71718501



Jose Fernando Yalan Novoa
DNI N° 74133161

INFORME DE ORIGINALIDAD–TURNITIN

Análisis cinemático y probabilístico para evaluar el desprendimiento de caída de rocas en taludes

INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	8%
2	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	1%
4	riunet.upv.es Fuente de Internet	1%
5	www.scielo.org.bo Fuente de Internet	1%
6	www.ptolomeo.unam.mx:8080 Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	1library.co Fuente de Internet	<1%
9	repositorio.unjfsc.edu.pe Fuente de Internet	

Dra. Vargas Chang Esther Jori

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación lo dedico con todo el aprecio del mundo a familiares y amigos que siempre estuvieron presente para poder brindar motivación y apoyo durante estos largos años de estudios, para lograr mi anhelo de ser ingeniero

Garcia Burgos, Jeanpierre

Dedico esta tesis a toda mi familia, en especial a mis padres y mis hermanos por apoyarme en todos los obstáculos presentes hasta llegar aquí

Yalan Novoa, Jose

AGRADECIMIENTO

Esta investigación significa un objetivo importante, desde nuestro comienzo en la universidad hasta la finalización con esta tesis.

Agradecemos a nuestros padres y familiares por todo el esfuerzo y dedicación brindada no solo para la formación profesional sino como personas.

A todos nuestros amigos por apoyarnos en extensas horas de estudio compartidas y consejos que guían en esta etapa.

Por último, a los docentes que nos dictaron las materias, gracias por sus enseñanzas e incentivando a tomar desafíos en la vida

Garcia Burgos, Jeanpierre

Yalan Novoa, Jose

ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACIÓN JURADA	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD–TURNITIN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Descripción de la realidad problemática	2
1.2 Formulación del problema.....	4
1.3 Objetivos de la investigación.....	4
1.4 Delimitación de la investigación	4
1.5 Justificación del estudio.....	5
1.6 Importancia del estudio	5
1.7 Limitaciones del estudio	6
1.8 Alcance	6
1.9 Viabilidad del estudio	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
2.1 Marco Histórico	8
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema	9
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	20
2.4 Definición de términos básicos.....	34
2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis.....	35
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS	36
3.1 Hipótesis	36
3.2 Sistema de variables	36
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	39
4.1 Método de investigación.....	39

4.2 Tipo de la investigación.....	39
4.3 Nivel de la investigación	39
4.4 Diseño de la investigación.....	39
4.5 Población y muestra.....	40
4.6 Técnicas e instrumentación de recolección de datos	40
4.7 Descripción de procesamiento de análisis	40
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADO	42
5.1 Presentación del caso.....	42
5.2 Ubicación.....	43
5.3 Geología Regional	43
5.4 Zonificación sísmica del sector analizado	48
5.5 Obtención de data estructural	49
5.6 Validación de la información	57
5.7 Análisis Cinemático.....	60
5.8 Análisis Probabilístico.....	64
5.9 Resultados del nuevo ángulo de diseño	67
CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN	74
CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES.....	78
REFERENCIAS.....	79
ANEXOS	83
Anexo A: Matriz de Consistencia.....	84
Anexo B: Resultados Análisis Cinemático.....	86
Anexo C: Resultados de Análisis Probabilístico Keyblock.....	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de las variables.....	37
Tabla 2 Data estructural para la familia 01	52
Tabla 3 Data estructural para la familia 02.....	54
Tabla 4 Data estructural para la familia 03.....	56
Tabla 5 Dip y dip direction de las familias	62
Tabla 6 Resultados de falla planar con ángulo de 83°	63
Tabla 7 Resultados de falla en cuña con ángulo de 83°.....	63
Tabla 8 Resultados de falla por vuelco con ángulo de 83°	64
Tabla 9 Criterios de Aceptabilidad de taludes rocosos.....	65
Tabla 10 Datos de entrada al Sblock	65
Tabla 11 Resultados del análisis probabilístico con ángulo de talud 83°.....	66
Tabla 12 Resultados de falla planar con ángulo de 63°	67
Tabla 13 Resultados de falla en cuña con ángulo de 63°.....	68
Tabla 14 Resultados de falla por vuelco con ángulo de 63°.....	68
Tabla 15 Resultados del análisis probabilístico con ángulo de talud 63°.....	69
Tabla 16 Tabla comparativa de resultados sobre los análisis cinemático y análisis probabilísticos para los ángulos de diseño del talud	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Árbol del problema.....	3
Figura 2	Talud con bloques rocosos	21
Figura 3	Rotura plana de talud rocoso	23
Figura 4	Representación de un plano en proyección estereográfica.....	23
Figura 5	Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura tipo planar.....	24
Figura 6	Rotura por vuelco (toppling)	25
Figura 7	Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por tipo vuelco.....	26
Figura 8	Rotura por cuña (cuneiforme)	27
Figura 9	Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura cuneiforme.....	28
Figura 10	Izquierda sección típica de análisis de caída de roca. Derecha ejemplo de trayectoria de caída de rocas.	30
Figura 11	Programa Easy Miner XR	30
Figura 12	Programa Minitab.....	32
Figura 13	Programa DIPS 6.0.....	33
Figura 14	Programa Sblock	34
Figura 15	Mapa Conceptual que sustenta la hipótesis.....	35
Figura 16	Condiciones del talud estudiado.....	42
Figura 17	Fotografía panorámica del talud en la carretera	43
Figura 18	Mapa de ubicación del cuadrángulo Chosica-24j.....	44
Figura 19	Mapa de geología regional del sector Chosica 24-j4	45
Figura 20	Mapa de geología local del sector estudiado.....	46
Figura 21	Presencia del tipo de roca en el talud	47
Figura 22	Columnas litológicas en el cuadrante 24-j4	48
Figura 23	Mapa de actividad sísmica del Perú	49
Figura 24	Área de detalle del barrido del vuelo programado	50
Figura 25	Modelo fotogramétrico 3D del talud analizado.....	51
Figura 26	Identificación de estructuras en el software EasyMiner XR	52
Figura 27	Validación Data Estructural Familia 01	58
Figura 28	Validación Data Estructural Familia 02	59
Figura 29	Validación Data Estructural Familia 03	60

Figura 30 Ploteo de concentración de polos	61
Figura 31 Set de Familias del talud	62
Figura 32 Distribución de bloques en el talud 83 grados	66
Figura 33 Distribución de bloques en el talud 63 grados	69
Figura 34 Ángulo de diseño vs Probabilidad de Ocurrencia de Falla- Análisis Cinemático	71
Figura 35 Ángulo de diseño vs Factor de Seguridad	72
Figura 36 Ángulo de diseño vs Probabilidad de Falla	72
Figura 37 Ángulo de diseño vs Porcentaje de ancho-berma libre	73

RESUMEN

La presente tesis titulada “Análisis cinemático y probabilístico para evaluar el desprendimiento de caída de rocas en taludes” tiene como objetivo disminuir, prevenir deslizamientos de rocas que estas interrumpen la fluides vehicular y comunicación en la carretera Lima-Canta km. 23+700 a km. 23+770. En nuestro análisis se realizó el vuelo sin tripulación para realizar capturas de varios ángulos del talud de estudio fotogramétrico 3D con Pix4Dmapper, también se realizó los análisis en software Easy Miner XR para la obtención de datos, identificación de discontinuidad de un talud, el software Minitab para obtener la frecuencia orientación de talud, el software Dips 6.0 para obtención de familias en el talud, el software Sblock basado en el método Keyblock, este realiza el análisis de bloques de talud. La orientación de la investigación es aplicada con un enfoque cualitativo ya que se tomó datos de la pendiente de talud mediante un software. Los resultados que se obtuvieron del talud con 83° evidencian que presenta un 55% de probabilidad de falla en la cual realizando el corte de talud correspondiente en 78° , 70° y 63° se obtuvo una gran disminución del desprendimiento de bloques de roca. Por lo tanto, se concluye que se debe realizar un corte en el talud para que este tenga un ángulo 63° ya que los resultados son favorables.

Palabras claves: Análisis cinemático, análisis probabilístico, probabilidad de falla, factor de seguridad, talud rocoso, estabilidad de talud.

ABSTRACT

The present thesis entitled "Kinematic and probabilistic analysis to evaluate the detachment of rock falls on slopes" aims to reduce and prevent rock slides that interrupt vehicular fluids and communication on the Lima-Canta km highway. 23+700 km. 23+770. In our analysis, the uncrewed flight was carried out to capture various angles of the slope for 3D photogrammetric study with Pix4Dmapper, the analyzes were also carried out in Easy Miner XR software to obtain data, identification of discontinuity of a slope, the Minitab software to obtain the slope orientation frequency, the Dips 6.0 software to obtain families on the slope, the Sblock software based on the Keyblock method, which performs the analysis of slope blocks. The orientation of the research is applicative with a qualitative approach since data on the slope slope was taken using software. The results obtained from the slope with 83° show that it has a 55% probability of failure in which by cutting the corresponding slope at 78° , 70° and 63° , a great decrease in the detachment of rock blocks was obtained. Therefore, it is concluded that a cut must be made in the slope so that it has a 63° angle since the results are favorable.

Keywords: Kinematic analysis, probabilistic analysis, probability of failure, safety factor, rock slope, slope stability.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio, genera información sobre la disminución de desprendimiento de rocas en taludes ya que, si abarcamos este conocimiento en todo ámbito de Lima, que esta cuenta con una alta probabilidad de ocurrencia de sismo, en la cual el desprendimiento de rocas en grandes masas por motivos de movimiento sísmico es muy recurrente, de tal manera que estas ocasionan obstrucción a los accesos de transporte, afectando económicamente por los altos costos de mantenimiento de carreteras. se debería invertir más en estudios de taludes logrando el objetivo para la disminución de caída de bloques en las vías.

El desarrollo consta de seis capítulos:

En el capítulo 1 se encuentra la descripción de la realidad problemática, árbol del problema, formulación del problema, objetivos de la investigación, delimitación de la investigación, justificación, importancia y limitaciones del estudio, alcance y viabilidad del estudio.

En el capítulo 2 se desarrolla el marco histórico, investigaciones relacionadas al tema, estructura teórica y científica que sustenta el estudio, definición de términos básicos y fundamentos teóricos que sustentan la tesis.

En el capítulo 3 se realiza la hipótesis y sistemas de variables.

En el capítulo 4 consta método, tipo, nivel y diseño de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentación de recolección de datos y descripción de procesamiento de análisis.

En el capítulo 5 presentación del caso, ubicación, geología regional, zonificación sísmica del sector, obtención de data estructural, Análisis cinemático, análisis probabilístico, resultados del nuevo ángulo de diseño y finalmente en el capítulo 6 se presenta discusión, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

1.1.1 Problema e importancia

El riesgo de desprendimiento de rocas en los taludes representa una amenaza alarmante para la seguridad de las personas y las infraestructuras ubicadas en áreas montañosas. El seguimiento de la estabilidad de taludes y la detección temprana de zonas riesgosas son cruciales para mitigar los peligros asociados y minimizar los posibles daños.

En el contexto geográfico del Perú, un país caracterizado por su relieve montañoso y la presencia de numerosos taludes rocosos a lo largo de su territorio, el riesgo de desprendimiento de rocas en las carreteras y zonas habitadas es una preocupación constante. La falta de evaluación precisa de la estabilidad de los taludes y la identificación temprana de áreas de riesgo contribuyen a una mayor vulnerabilidad ante eventos de deslizamiento de rocas y sus consecuencias, como fallecimiento de personas, daños a la infraestructura y afectación a la actividad económica.

En el trayecto de la carretera Lima-Canta sucede de manera ocasional desprendimiento de rocas ya sea por precipitaciones y/o sismos que cierran el tránsito de la vía, además de posiblemente ocasionar accidentes automovilísticos a las personas.

Los taludes rocosos en la carretera Lima-Canta presentan características geotécnicas específicas que requieren una atención especial en términos de estabilidad y riesgo de desprendimiento de rocas. Estos taludes se encuentran en una zona montañosa y están compuestos principalmente por formaciones rocosas, lo que los hace susceptibles a fenómenos como la erosión, la deformación y los deslizamientos.

El clima y la variabilidad de las condiciones ambientales intervienen en la estabilidad de los taludes rocosos en la ruta mencionada. Las lluvias intensas, cambios de temperatura y fenómenos sísmicos pueden aumentar la presión hidrostática, la expansión y contracción de las rocas, así como la actividad geodinámica, lo que incrementa el riesgo de desprendimientos y deslizamientos. El tramo de la carretera Lima-Canta km.23+700 a km23+770 será objeto de estudio de investigación, donde predomina fallas y estructuras que inducen caídas de rocas en los taludes.

La evaluación precisa de la estabilidad de los taludes y la identificación temprana de sectores propensas a desprendimientos son fundamentales para reducir el riesgo de

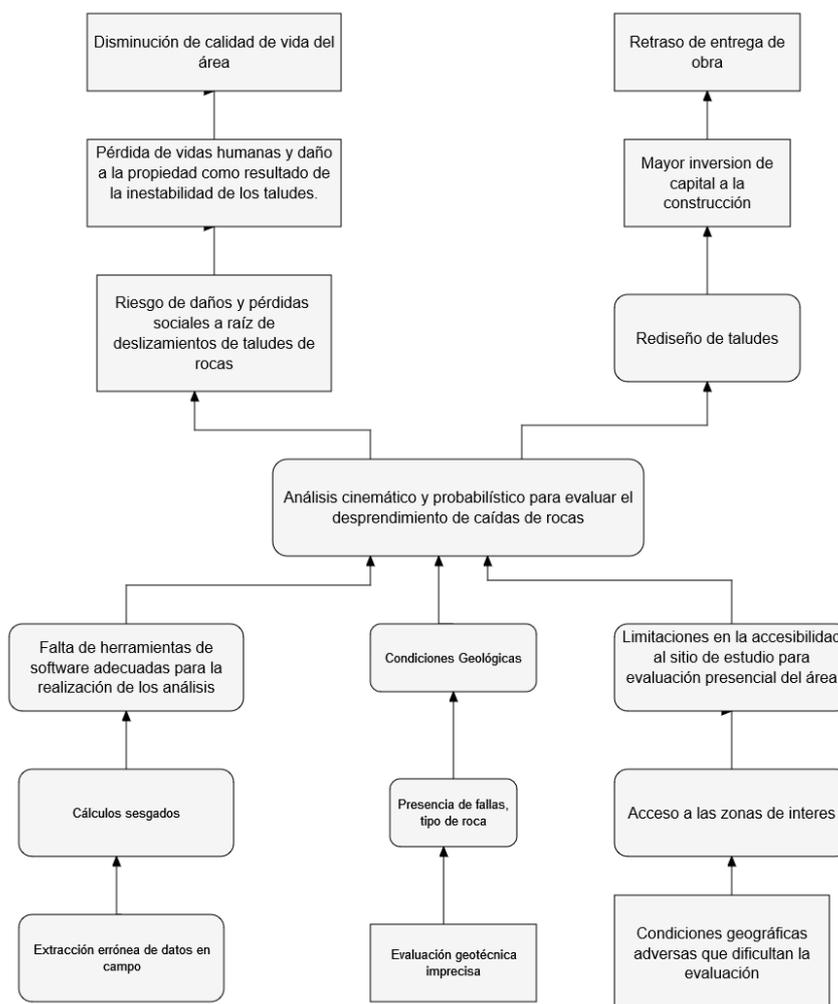
accidentes y minimizar los daños asociados. Sin embargo, los métodos tradicionales de análisis estructural y monitoreo en taludes presentan limitaciones en términos de precisión, tiempo y costo. Por lo tanto, existe la necesidad de explorar nuevas técnicas y enfoques que puedan mejorar la evaluación de estabilidad de los taludes y permitir una gestión más efectiva del riesgo por desprendimiento de rocas.

1.1.2 Árbol del problema (Causas – Problema –Consecuencias)

En la Figura 1 , se muestra el árbol del problema que nos ayuda a identificar las causas y mencionar los efectos respectivos de la realidad problemática.

Figura 1

Árbol del problema



Nota. Elaboración propia. Diagrama Causa-Problema-Consecuencias de tres niveles.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

- ¿Cuál es el nuevo ángulo de diseño geotécnico que se obtiene mediante el análisis Cinemático y Probabilístico para disminuir el riesgo de desprendimiento de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima-Canta tramo km.23+700 a km.23+770?

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo la generación del modelo fotogramétrico 3D permite obtener data estructural de las discontinuidades?
- ¿Cuáles son las probabilidades de ocurrencia de falla del talud mediante el análisis cinemático que determina la inestabilidad de bloques rocosos?
- ¿Cuál es la probabilidad de falla y factor de seguridad del talud mediante el análisis probabilístico que determina la inestabilidad de bloques rocosos?
- ¿Cómo los ángulos de diseño del talud influyen en los resultados de los análisis cinemático y probabilístico?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

- ✓ Evaluar los ángulos de diseño geotécnico mediante el análisis Cinemático y Probabilístico para reducir el riesgo de desprendimiento de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima-Canta tramo km.23+700 a km.23+770.

1.3.2 Objetivos específicos

- Generar el modelo fotogramétrico 3D para la obtención data estructural de las discontinuidades.
- Calcular las probabilidades de ocurrencia de falla del talud mediante el análisis cinemático para determinar la inestabilidad de bloques rocosos.
- Calcular la probabilidad de falla y factor de seguridad del talud mediante el análisis probabilístico para determinar la inestabilidad de bloques rocosos.
- Simular los nuevos ángulos de diseño geotécnico para disminuir los resultados de los análisis cinemático y probabilístico

1.4 Delimitación de la investigación

1.4.1 Geográfica

Canta está ubicada a una altura de 2819 m.s.n.m., presentando mayor altitud a la provincia de Lima el sector de estudio de tesis será aplicado en la carretera Lima-Canta tramo km.23+700 a km.23+770 a una altitud de 785 metros, Provincia de Canta, Departamento

de Lima.

1.4.2 Temporal

Esta investigación será desarrollada en un periodo de seis meses, desde mayo a octubre del 2023.

1.4.3 Temática

El tema de enfoque de la tesis es la evaluación del desprendimiento de rocas en taludes rocosos en las progresivas de km.23+700 a km+23.770 la carretera Lima - Canta.

1.4.4 Muestral

La presente investigación, se describe información recopilada de artículos, tesis e información del macizo rocoso mediante evaluación del modelo fotogramétrico 3D para poder realizar los análisis mencionados.

1.5 Justificación del estudio

1.5.1 Conveniencia

La investigación es conveniente ya que busca reducir el riesgo de desprendimiento de rocas mediante los análisis cinemático y probabilístico de los taludes de la carretera Lima-Canta, lo cual representa un método innovador y eficiente que disminuya este tipo de accidentes en las vías del país.

1.5.2 Aplicaciones prácticas

Esta investigación se podrá consultar como bibliografía en el futuro para aplicarla con la finalidad minimizar el riesgo de desprendimiento de rocas de taludes rocosos en construcción y monitoreo de carreteras, acantilados aledaños a edificaciones, taludes en mina tajo abierto.

1.5.3 Utilidad metodológica

El estudio permite obtener propiedades índices de las discontinuidades en los taludes a través del procesamiento de nube de puntos, además se recopilará información sobre la geología regional, caracterización geotécnica del lugar analizado para realizar la evaluación de desprendimiento de rocas.

1.5.4 Valor teórico

La presente tesis aporta valor teórico al campo de la geotecnia y la evaluación de desprendimientos de rocas a través del análisis de la estabilidad de taludes rocosos, ya que se propone uso de la tecnología para lograr diseños más rápidos y efectivos.

1.6 Importancia del estudio

1.6.1 Nuevos conocimientos

El aporte de la investigación resalta en el procesamiento de la nube de puntos para obtener

data estructural precisa de discontinuidades del macizo rocoso para luego realizar la evaluación de estabilidad y estimación del desprendimiento de bloques rocosos, ya que se puede obtener las propiedades índices de las fracturas con menos exactitud mediante instrumentos como brújula Brunton y wincha.

1.6.2 Aporte

La importancia de la investigación radica en el procesamiento de la nube de puntos para obtener data estructural precisa de las discontinuidades en el macizo rocoso para luego realizar la evaluación de estabilidad y estimación del desprendimiento de rocas, ya que se puede obtener las propiedades índices de las fracturas con menos exactitud mediante instrumentos como brújula Brunton y wincha.

1.7 Limitaciones del estudio

1.7.1 Falta de estudios previos de investigación

Existe escasos estudios como tesis, artículos y estudios previos sobre estabilidad de taludes en la Carretera Lima-Canta, se investigó arduamente para obtener información geotécnica y geológica de la zona.

1.7.2 Metodológicos o prácticos

La falta de estandarización en las normas de las bibliografías consultadas puede generar un sesgo en los resultados, lo cual podría tener efectos adversos en factor de seguridad de taludes y probabilidad de falla.

1.7.3 Medidas para la recolección de los datos

Al revisar los estudios previos, se tuvo que aplicar un criterio minucioso para identificar y seleccionar aquellas que abarcaran las zonas del sector de interés y proporcionaran la información adecuada para realizar la tesis. Además de realizar tomas de fotografía de alta resolución con drones.

1.7.4 Obstáculos en la investigación

Debido a las dificultades para obtener datos específicos de la zona, se tuvo que recurrir a diferentes métodos para obtener la información necesaria. Estos métodos incluyeron la búsqueda en bases de datos, la revisión de tesis previas, la investigación en internet, entre otras estrategias.

1.8 Alcance

En el presente estudio se realizará la disminución del riesgo de desprendimiento de rocas aplicando análisis cinemático y análisis probabilístico de los taludes de la carretera Lima Canta que podrá replicarse para diversas construcciones civiles y/o mineras donde se requiera la formación de taludes de rocosos.

1.9 Viabilidad del estudio

De acuerdo con Hernández et al. (2014), señala que “la viabilidad o factibilidad del estudio; para ello, debemos tomar en cuenta la disponibilidad de tiempo, recursos financieros, humanos y materiales que determinarán, en última instancia, los alcances de la investigación” (p.41).

- ✓ La tesis tiene un plazo de desarrollo de seis meses desde mayo a octubre del año 2023. Este tiempo es adecuado para la elaboración completa de la investigación.
- ✓ El tramo de la carretera Lima-Canta en análisis está en la provincia de Canta a una hora de la ciudad de Lima Metropolitana, por lo tanto, no se presenta inconvenientes acceder al área de estudio.
- ✓ La presente investigación no implica un costo excesivo ya que será documental y descriptiva, por lo cual no genera inconvenientes económicos para la elaboración.
- ✓ Se pidió apoyo a empresas consultoras para poder emplear los softwares licenciados que son necesarios para realizar la investigación. Además de requerir, vuelo con dron para obtener nube de puntos y levantamiento topográfico in-situ.
- ✓ Para recopilar fuentes de información, se utilizaron múltiples plataformas académicas, como Alicia, ProQuest, Scopus, Scielo, entre otras.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Histórico

En la actualidad, el estado peruano enfrenta un desafío en lo que respecta al análisis de la estabilidad de los taludes. No existen normativas legales que permitan evaluar de manera uniforme la estabilidad de estas pendientes. La falta de regulación a nivel estatal complica la calificación precisa de las condiciones de estabilidad en los taludes como parte integral de su estructura geométrica. Esto requiere una estandarización de las calificaciones de los índices de factor de seguridad y condiciones de estabilidad.

Esta carencia de regulación se traduce en la ausencia de un Plan de Contingencia y un Estudio Hidrológico-Hidrogeológico Hidráulico-Hidrotécnico que sirvan como base para abordar los problemas de colapso en las carreteras. Cabe destacar que los estudios empíricos en Perú son exhaustivos, lo que sugiere la necesidad de una investigación detallada en el terreno, ya que no es sencillo discernir el comportamiento de las arcillas debido a sus ubicaciones variables, así como identificar las 22 intercalaciones entre las rocas esquistosas inestables y las rocas andesíticas de alto RMR.

Desde una perspectiva de objetivos y propósitos, se ha concluido que el objetivo primordial no es solo la carretera en sí misma y su estructura, sino los taludes adyacentes que colapsan y obstaculizan el tráfico. Existe una relación directa entre el estudio de los taludes y los problemas como colapsos, subsidencias, deslizamientos y derrumbes causados por la interacción entre el suelo y la roca, lo que perturba el equilibrio físico de las condiciones de estabilidad. Para abordar esto, se deben implementar medidas de mantenimiento adecuado de la carretera, brindándole estabilidad y obteniendo apoyo de canteras de materiales para su construcción.

Es fundamental determinar la resistencia del macizo rocoso en puntos críticos de la carretera para comprender su comportamiento, fracturación y otros factores cualitativos y cuantitativos relacionados con el movimiento de materiales. La estabilidad de los taludes de roca está influenciada por las características geomecánicas del macizo rocoso, el estado de conservación del propio talud y las condiciones de infiltración de agua. Los diferentes tipos de fallos están vinculados al grado de fracturación del macizo rocoso y la orientación, distribución de las discontinuidades, siendo la estabilidad determinada por los parámetros de resistencia de estas discontinuidades y la matriz rocosa.

La estabilidad de taludes en roca es un aspecto esencial en el ámbito del diseño de infraestructuras civiles tales como ferrocarriles o carreteras. Más concretamente, las

roturas o fallos de los taludes rocosos de líneas de ferrocarril pueden poner en riesgo la seguridad o funcionamiento normal del servicio, resultando imprescindible la evaluación de su seguridad frente a posibles fallos.

La investigación de taludes excavados en roca puede realizarse utilizando enfoques empíricos, como clasificaciones geomecánicas, o mediante análisis de estabilidad. En ambas situaciones, se requiere la recopilación de información in situ sobre las propiedades y características del macizo rocoso, que implica la medición y estimación de varios parámetros de la roca madre y sus discontinuidades.

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Investigaciones internacionales

Monte (2020) En este estudio de pregrado, se examinaron dos situaciones distintas en dos taludes rocosos en la provincia de Concepción. Uno de estos taludes, denominado A, se mantiene firme, mientras que el talud B experimenta el deslizamiento de un material en forma de cuña. El objetivo principal consiste en emular las condiciones reales de ambos taludes mediante un modelo numérico, interpretar los resultados y contrastarlos con las observaciones de campo para identificar las causas del deslizamiento en el talud B. Se empleó un enfoque de modelado continuo, respaldado por el método de elementos finitos, que se considera la opción más adecuada para esta investigación.

Al analizar estos cuatro aspectos, se llegó a la conclusión de que, al emplear el método SSR a través de elementos finitos, se pueden evaluar las condiciones de estabilidad en ambos taludes. En ambos casos, se obtuvieron factores de seguridad superiores a 1. Sin embargo, estos resultados no coinciden con las condiciones observadas en el terreno, especialmente en el caso del talud B y su problema de falla por cuña.

“El estudio se considera no concluyente, debido a que varias propiedades de roca y discontinuidades definidas en la metodología experimental fueron obtenidas mediante aproximación empírica o con ensayos cuyas muestras no cumplen con condiciones de calidad deseadas, al ser obtenidas de forma posterior a su desprendimiento, exponiéndolas a un grado mayor de meteorización por las condiciones ambientales, posible daño por el impacto del desprendimiento y fenómenos físicos como descompresión, lo que repercute directamente en los ensayos de resistencia a la compresión uniaxial, módulos elásticos, ángulo de fricción y criterio de resistencia de discontinuidades. El resto de las propiedades tratadas muestran resultados confiables, específicamente la altura medida de cada perfil y su inclinación, densidad de roca, condiciones geológicas en terreno y la orientación de las estructuras medidas.” (p. 79).

Hernández (2022) La tesis se centra en el análisis de modelos virtuales de taludes rocosos y propuestas de estabilización en la carretera autonómica AS-29 en Asturias. A través del uso de herramientas como CloudCompare, la autora ha obtenido modelos digitales de afloramiento y orientación 3D de los taludes, lo que ha permitido una mejor comprensión de su geometría y estabilidad. Los principales hallazgos y resultados obtenidos a través del análisis de los modelos virtuales de taludes rocosos y las propuestas de estabilización en la carretera. Se podrían mencionar los aspectos más relevantes y significativos descubiertos durante la investigación.

Presenten medidas concretas para mejorar la estabilidad de los taludes rocosos en la carretera. Estas propuestas podrían incluir la instalación de mallas de protección, la construcción de muros de contención, la excavación de taludes u otras soluciones adecuadas para cada caso específico. La importancia de los modelos virtuales de taludes rocosos en la estabilización de carreteras y resalta la utilidad de herramientas como CloudCompare para obtener información detallada sobre la geometría y la estabilidad de los taludes.

Utilizar modelos virtuales para el análisis y la estabilización de taludes rocosos en carreteras. Se podrían mencionar los beneficios de esta metodología, como la capacidad de visualizar y comprender mejor la geometría y la estabilidad de los taludes, así como la posibilidad de probar diferentes escenarios y soluciones de estabilización de manera virtual antes de implementarlas en la realidad.

Villareal (2019) En su tesis para ingeniero geólogo en la Universidad Nacional Autónoma de México tiene como finalidad realizar una metodología para obtener las propiedades índices de juntas en excavaciones al aire libre. Esto implica la realización de vuelos con drones sobre los taludes propensos a deslizamientos de rocas. Además, se busca comparar los datos de orientación de las fracturas, obtenidos a través de la fotogrametría aérea y la medición manual con una brújula convencional. Dos lugares se han estudiado como casos de ejemplo: la Presa de Achoquen en Zacatecas y el afloramiento conocido como "La Escuelita" en C.U., UNAM, Ciudad de México. En el primer sitio, se observó una desviación angular que varía entre 2.06° y 3.4° al comparar los datos de orientación media tomados de la nube de puntos con los datos obtenidos con la brújula. En el proyecto de "La Escuelita," la desviación fue de 1.21° entre los resultados de ambas técnicas de medición.

La fotogrametría digital se presenta como una herramienta valiosa cuando se necesita un análisis objetivo y detallado de la orientación de las discontinuidades en un talud. Ofrece

resultados fiables y permite una categorización más completa de las familias de fracturas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta herramienta complementa la geología local y no reemplaza las demás observaciones necesarias para una descripción de resistencia física de un macizo rocoso.

Niño (2017) Esta investigación representa un esfuerzo de profundización con el propósito de enriquecer el proyecto de investigación "Evaluación Cuantitativa de Amenazas" dirigido por el Grupo de Investigación GIGUN, respaldado por Colciencias y la Universidad Nacional. La meta principal de este proyecto es presentar una metodología de análisis que incorpore consideraciones más realistas acerca de la naturaleza interrumpida de un macizo rocoso, además de abordar la estimación de la incertidumbre aleatoria inherente a los análisis.

La metodología sugerida se apoya en la simulación numérica de un macizo rocoso utilizando el software FLAC3D, que posibilita la simulación de su respuesta mecánica frente a diversas cargas y condiciones. Un conjunto de datos provenientes de un proyecto minero en Colombia se empleó para aplicar esta metodología, ejecutando múltiples análisis con el fin de evaluar tanto la estabilidad del macizo como la influencia de distintos factores en su comportamiento.

Las conclusiones del estudio indican que la metodología propuesta brinda una mejor comprensión del comportamiento del macizo rocoso y permite una evaluación más precisa de su estabilidad. Además, se han identificado ciertos factores críticos que pueden incidir en la estabilidad del macizo, tales como la presencia de fallas y la variabilidad de las propiedades mecánicas del macizo. En consecuencia, se sugiere que esta metodología sea empleada en futuros proyectos de ingeniería geotécnica para mejorar la exactitud de los análisis y disminuir los riesgos relacionados con la estabilidad del macizo rocoso. En síntesis, el trabajo de John Jairo Niño Montes representa una contribución significativa al ámbito de la geotecnia y la ingeniería civil, ofreciendo una metodología valiosa para mejorar la evaluación de la estabilidad de los macizos rocosos.

Riquelme (2015) En este estudio aborda el empleo de nubes de puntos en 3D para identificar y caracterizar discontinuidades en masas rocosas. Las nubes de puntos se adquieren mediante métodos sintéticos, escáner láser 3D y fotogrametría digital Structure From Motion (SfM). El enfoque se centra en la extracción y caracterización de familias de discontinuidades, utilizándolas para evaluar la calidad de taludes rocosos a través de la clasificación geomecánica SMR. El contenido se divide en tres bloques: metodología de extracción y clasificación de nubes de puntos 3D, análisis de espaciamentos normales

en estas nubes y evaluación de la calidad geomecánica de taludes mediante SMR.

La primera línea investiga las nubes de puntos 3D para extraer discontinuidades en la superficie rocosa, desarrollando una nueva metodología y software llamado Discontinuity Set Extractor (DSE). La segunda línea estudia el espaciado entre discontinuidades planas en masas rocosas a partir de nubes de puntos 3D, proponiendo un método que determina el espaciado normal basándose en principios de campo sin restricciones espaciales. La tercera línea analiza la aplicación de información obtenida de nubes de puntos 3D en la evaluación de la calidad de taludes rocosos mediante SMR. Se destaca la influencia de diferentes fuentes de información en la determinación de factores de ajuste y valores de SMR, mostrando que cambios de hasta una clase geomecánica pueden ocurrir con el uso de fuentes y técnicas ampliamente aceptadas. Los métodos y programas desarrollados representan un avance significativo para el estudio y caracterización de discontinuidades en masas rocosas, así como su aplicación en la evaluación de la calidad de taludes en roca mediante clasificaciones geomecánicas.

2.2.2 Investigaciones nacionales

Villanueva (2019) en la presente tesis de pregrado de la Universidad Nacional De San Agustín De Arequipa para obtener el título de ingeniero geólogo tiene como objetivo proponer un enfoque automatizado para obtener información sobre las discontinuidades en macizos rocosos a partir de un modelo digital 3D generado mediante LiDAR y Structure From Motion (SFM). Este enfoque implica la extracción de vectores normales de superficies casi planas identificadas en el modelo y su agrupación en función de su similitud utilizando un algoritmo difuso. Luego, se lleva a cabo un análisis geomecánica para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos. Los resultados de la aplicación de esta metodología en los casos de estudio demuestran una adecuada caracterización de las propiedades geométricas de las discontinuidades.

Chávez (2020) en la presente tesis se adentra en la investigación de la estabilidad de laderas rocosas, un tema que a menudo se pasa por alto en la ingeniería geotécnica y que es poco comprendido. La estabilidad de estas pendientes rocosas es de gran importancia para la seguridad pública en carreteras y para garantizar la seguridad del personal y los equipos que trabajan en la excavación de rocas.

Las pendientes en rocas pueden verse afectadas por varios factores, como su forma, discontinuidades geológicas, la naturaleza del material y condiciones climáticas extremas. Además, las cargas externas, como fuertes lluvias con altos niveles de

precipitación y actividad sísmica, pueden desencadenar deslizamientos en estas pendientes rocosas.

En su investigación, Chávez desarrolla dos métodos, uno cinemático y otro empírico llamado "Índice de Riesgo" (traducción de "Hazard Index"), para evaluar la estabilidad de una pendiente rocosa específica en la carretera Tarapoto-Yurimaguas. Esta pendiente está compuesta por una roca residual de baja resistencia y se encuentra en una zona tropical con fuertes precipitaciones y riesgo sísmico.

Es importante destacar que la investigación aborda algunas limitaciones en el análisis de la estabilidad de pendientes rocosas, ya que excluye posibles fallas que podrían ocurrir en estas pendientes. Además, se observa que muchas fallas catastróficas en estructuras críticas han sido causadas por deslizamientos de rocas debidos a fuertes lluvias y actividad sísmica en zonas sísmicas, factores que a menudo se pasan por alto u omiten en el análisis. Por lo tanto, al realizar un análisis que incorpora tantos factores cinemáticos como aquellos relacionados con precipitación y sismicidad, se obtiene una comprensión más completa de la estabilidad de la pendiente rocosa y se reducen las omisiones de estos factores externos clave, lo que permite un análisis más cercano a la realidad.

Arones (2021) La tesis se enfoca en examinar la estabilidad de un talud de roca en el asentamiento humano Inty Llacta, con especial atención a cómo la descripción de las discontinuidades influye en este análisis. El propósito general de la investigación es determinar el impacto de la caracterización de las discontinuidades en la evaluación de la estabilidad de dicho talud en Inty Llacta. Para alcanzar este objetivo general, se establecen tres objetivos específicos. El primero es identificar cómo la caracterización de las discontinuidades afecta el análisis cinemático del talud en roca en Inty Llacta, que se refiere al estudio de los movimientos y desplazamientos de las masas rocosas en el talud. Estas discontinuidades, que corresponden a fracturas o planos de debilidad en la roca, son esenciales para comprender el comportamiento del talud y evaluar los riesgos de deslizamiento asociados. El segundo objetivo busca determinar cómo la caracterización de las discontinuidades incide en la clasificación geomecánica conocida como "Slope Mass Rating" (SMR) del talud en roca en este asentamiento. El SMR es un método empleado para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos y se basa en la clasificación de varios parámetros geotécnicos, como la resistencia de la roca, la orientación de las discontinuidades y la presencia de agua.

Por último, el tercer objetivo tiene como finalidad evaluar cómo la caracterización de las discontinuidades afecta la clasificación geomecánica "Qslope" del talud en roca en Inty Llacta, otro método utilizado para evaluar la estabilidad de los taludes rocosos. Este método se basa en la clasificación de diversos parámetros geotécnicos, como la resistencia de la roca, la geometría de las discontinuidades y la presión de agua. En resumen, la investigación llevada a cabo en la tesis ha permitido determinar la influencia de la caracterización adecuada de las discontinuidades en el análisis de la estabilidad del talud de roca en el asentamiento humano Inty Llacta. Los resultados obtenidos subrayan la importancia crucial de esta caracterización para comprender el comportamiento del talud y evaluar su estabilidad de manera precisa.

Carhuatanta (2020) En la presente investigación de pregrado en la Universidad César Vallejo tiene como objetivo analizar la estabilidad del macizo rocoso en la carretera Cutervo - Puerto Chiple. Identificaron problemas de inestabilidad en los taludes rocosos debido a diversas condiciones del terreno. Se examinaron 5 estaciones geomecánicas ubicadas entre los kilómetros 33+240 y 34+240 de la carretera en cuestión. Se emplearon técnicas de análisis documental y observación, así como métodos analíticos y de procesamiento de datos. Los resultados indicaron que la calidad de la roca predominante era buena (Tipo II) y el factor de seguridad en condiciones pseudo-estáticas era de 1.098. Esto respaldó la hipótesis de que el análisis estructural del macizo rocoso podría determinar la estabilidad de los taludes en la carretera Cutervo - Puerto. En conclusión, se señaló que el talud era inestable y que se requeriría modificar la altura o el ángulo del talud para lograr un factor de seguridad adecuado.

Novoa (2019) en su tesis de pregrado en la Universidad Nacional de Cajamarca investiga sobre una evaluación geotécnica de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilte - Puente Muyuna, con el fin de determinar su estabilidad y proponer medidas de mitigación para evitar posibles deslizamientos. La muestra utilizada en la investigación consistió en los taludes en roca de la carretera del tramo Chilte - Puente Muyuna, ubicada en la región de Loreto, Perú. Se realizaron estudios geológicos y geotécnicos para determinar las características de los macizos rocosos. Los resultados finales de la investigación indican que los taludes en roca de la presentan inestabilidad con factores de seguridad a 0.58 a 1.20 y riesgo de deslizamiento debido a la presencia de discontinuidades y debilidades en los macizos rocosos, con fallas planar probables de 27 a 40 % o falla en cuña de 30-35 %. Se propusieron medidas de mitigación como la instalación de mallas de sostenimiento y la construcción de drenajes para evitar la

acumulación de agua en los taludes. En conclusión, la evaluación geotécnica de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilte - Puente Muyuna es de gran importancia para garantizar la seguridad de los usuarios de la vía y evitar posibles accidentes. La aplicación de diferentes metodologías permitió determinar la inestabilidad de los taludes y proponer medidas de mitigación efectivas para garantizar su estabilidad a largo plazo.

2.2.3 Artículos relacionados con el tema

Haswanto (2008) En el estado de Selangor, Malasia, se encuentra un macizo rocoso de granito a lo largo de la carretera Semenyih-Sg.Long (SSL) que presenta diversas discontinuidades importantes y conjuntos menores. Esto complica la ingeniería en pendientes empinadas. Las principales discontinuidades tienen orientaciones específicas: J1 ($36^{\circ}/66^{\circ}$), J2 ($152^{\circ}/60^{\circ}$), J3 ($79^{\circ}/88^{\circ}$), J4 ($117^{\circ}/66^{\circ}$), y ff5 (1050/700). Tras analizar los datos, se identificaron dos tipos clave de bloques: tipo I (JP 1000 y JP 1100) y tipo II (JP 1110).

Los resultados revelaron ángulos seguros de pendiente máxima: 70° para tipo I y 72° para tipo II. Sin embargo, la pendiente de corte en SSL (80°) es mayor, lo que demanda un sistema de soporte adecuado para mantener la estabilidad a largo plazo en este talud rocoso de granito fresco con estas discontinuidades.

Delgado-Reivan et al. (2023), el artículo examina la estabilidad de seis pendientes en la carretera Cuenca-Girón-Pasaje utilizando diferentes métodos, incluyendo la técnica de Estructura a partir del Movimiento (SfM) con sensores remotos de bajo costo. Se utilizó el análisis manual con herramientas como Cloud Compare y el análisis automatizado con el programa Extractor de Conjunto de Discontinuidades (DSE). Se compararon mediciones manuales y remotas, mostrando una diferencia razonable. Se emplearon cinco metodologías de análisis, incluyendo sistemas de clasificación de masas rocosas (SMR, RHRsmod y Qslope), análisis cinemático y análisis analítico (equilibrio límite). Los resultados se compararon con observaciones de campo para determinar los enfoques más adecuados.

El análisis automático proporcionó parámetros como orientación, cantidad, espaciado y persistencia de las discontinuidades, mejorando la confiabilidad de los hallazgos. Estos resultados concuerdan con los obtenidos mediante el análisis manual. La contribución principal del artículo radica en el uso de técnicas eficientes y económicas para evaluar la estabilidad de pendientes, siendo relevantes para países andinos. Estos análisis pueden integrarse en procedimientos e informes técnicos. Destaca que el sistema SMR, basado en información disponible y técnicas de bajo costo, ofrece los mejores resultados y se

ajusta mejor a la realidad del área de estudio. Se considera esencial para evaluar los riesgos de desprendimiento de rocas mediante métodos modificados de RHRS.

Mammoliti et al. (2023), en este estudio se investigó un acantilado rocoso afectado por desprendimientos de rocas utilizando análisis cinemáticos, modelado de Red de Fracturas Discretas (DFN) y pruebas de trazadores artificiales. Se utilizaron modelos virtuales tridimensionales de alta resolución generados mediante la técnica de fotogrametría Estructura a partir de Movimiento (SfM) para obtener el modelo DFN y los posibles mecanismos de falla de bloques rocosos. Se inyectó un trazador artificial en la zona de recarga del acantilado utilizando un infiltrómetro de doble anillo para determinar la tasa de infiltración y validar los resultados del modelo DFN.

La integración de la fotogrametría digital, el modelado de DFN y las pruebas de trazadores representa un avance en los estudios de desprendimientos de rocas y deslizamientos de tierra. Este enfoque permitió identificar los patrones de flujo de agua subterránea dentro del sistema de fracturas y reveló un tiempo de tránsito del trazador de aproximadamente 10 días desde el área de inyección hasta la pendiente monitoreada. Se obtuvieron valores de conductividad similares tanto del modelo DFN como de la prueba de trazadores.

Se determinó que las fallas planas y de cuña con volúmenes de 0.1 a 1 m³ son los mecanismos de falla más probables en las áreas estudiadas. Estos resultados concuerdan con los retrasos observados entre las intensas lluvias y los desprendimientos de rocas previamente documentados en el área de estudio, respaldando los mecanismos identificados.

Sayantan et al. (2022), Este estudio evalúa la estabilidad de una ladera en formaciones rocosas de Siwalik a lo largo de un antiguo camino sin pavimentar que conecta Dehradun con el pueblo de Thangaon a través de Dunga, en las estribaciones del Himalaya. La carretera forma parte de una vía importante propuesta que conecta Dehradun-Mussoorie.

Las rocas duras en la zona son areniscas masivas de grano medio compuestas principalmente por cuarzo y menos propensas a la meteorización. Por otro lado, las rocas blandas son areniscas de grano fino, ricas en cuarzo y con minerales micáceos/arcillosos, más susceptibles a la meteorización.

Se encontraron juntas prominentes en las rocas duras, con aberturas que varían en tamaño. El análisis cinemático revela que aproximadamente el 50% de las ubicaciones tienen riesgo de falla por cuña debido a la orientación de los planos de estratificación, las juntas

naturales y las caras de excavación. Se determinó que las carreteras orientadas en dirección NNW-SSE con crestas a la izquierda son más vulnerables a los deslizamientos de rocas. Las orientaciones de las juntas naturales en relación con las capas son impredecibles, presentando juntas paralelas, perpendiculares y oblicuas en varias ubicaciones. La mayoría de los desprendimientos de rocas ocurren durante la temporada de monzones, donde el agua adicional de las lluvias actúa como un catalizador para las fallas. Se sugirieron medidas correctivas selectas basadas en las observaciones de campo.

Pagano et al. (2020), Este artículo introduce una metodología para caracterizar masas rocosas mediante el uso de Escáner Láser Terrestre (TLS) y Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), con el objetivo de evaluar la estabilidad de taludes. La metodología se basa en la obtención de nubes de puntos georreferenciados utilizando GPS y Estación Total, lo que permite medir la inclinación y espaciado de los planos en la masa rocosa. El artículo describe los pasos necesarios para la adquisición y procesamiento de los datos, incluyendo la limpieza, filtrado de la nube de puntos para mantener secciones representativas de la masa rocosa. También se discuten las ventajas, desventajas y limitaciones de estas técnicas, señalando la necesidad de investigaciones futuras.

Se presentan dos casos de estudio donde se aplicó esta metodología. En el primero, se empleó una combinación de técnicas de TLS y UAV para estudiar un acantilado en Santa Caterina, Italia. En el segundo caso, se utilizó la técnica de TLS para examinar una cueva en Castellana, Italia. En ambos casos, se obtuvieron resultados satisfactorios, demostrando la eficacia de la metodología propuesta. El artículo también referencia estudios anteriores y experiencias directas de los autores, quienes identificaron las ventajas y desventajas de estas técnicas. Además, se proporcionan referencias a otros trabajos relacionados con la excavación de cavidades artificiales y el modelado numérico de posibles mecanismos de falla en cuevas subterráneas. En conclusión, este artículo presenta una metodología innovadora para la caracterización de masas rocosas mediante el uso de técnicas de Escáner Láser Terrestre (TLS) y Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), con el propósito de evaluar la estabilidad de taludes. Los casos de estudio presentados demuestran la eficacia de la metodología propuesta y su potencial para mejorar la seguridad en la planificación y diseño de trabajos de estabilización de taludes.

Herrero et al. (2022), Este trabajo presenta una caracterización de masas rocosas en una cantera de piedra caliza en el norte de España. Utilizando un modelo tridimensional obtenido a partir de fotografías tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) y algoritmos de estructura a partir de movimiento, se logra obtener información

fotogramétrica de manera rápida y económica. Las facetas geológicas planares, como la estratificación y las fallas, se analizan para evaluar la estabilidad de los taludes, y los modelos geológicos tridimensionales ayudan a superar las limitaciones de las mediciones tradicionales utilizando brújulas y clinómetros. Los resultados de este estudio demuestran la eficacia del uso de UAV para desarrollar modelos de afloramiento virtual y obtener mediciones precisas.

El modelo tridimensional generado se comparte en plataformas de acceso abierto como Sketchfab, lo que facilita el acceso a esta información para un amplio público. Además, esta metodología tiene aplicaciones en geociencias, minería e ingeniería civil, y puede ser útil para la toma de decisiones por parte de responsables políticos y autoridades. También se destaca su utilidad para fines educativos, como complemento a las clases de campo tradicionales o para desarrollar excursiones y laboratorios virtuales. En resumen, el uso de UAV y algoritmos de estructura a partir de movimiento proporciona una forma económica, rápida y sencilla de caracterizar masas rocosas y acceder a áreas de difícil acceso.

Medinaceli et al. (2021), en este estudio se emplea una metodología basada en la simulación de Montecarlo para evaluar la estabilidad de un talud rocoso con posibles fallas en forma de cuña. Se comienza evaluando la estabilidad del talud seleccionado mediante un enfoque determinístico para calcular el correspondiente factor de seguridad. Luego, se desarrolla una metodología para el diseño probabilístico del mismo talud en el caso de estudio. Se sigue paso a paso el método recomendado por la simulación de Montecarlo para abordar el problema.

En última instancia, se llevan a cabo experimentos de simulación utilizando el modelo construido, lo que permite inicialmente validar dicho modelo. En el enfoque determinístico, se obtiene un factor de seguridad de 1.6 para el talud, indicando su estabilidad (con un factor de seguridad superior a 1). En contraste, el diseño probabilístico revela que la media de los factores de seguridad obtenidos en mil experimentos con el modelo de simulación es de 2.922, y la probabilidad de falla del talud es del 17.8%. Esta probabilidad refleja la fiabilidad del diseño y se estima gracias a la aplicación de la simulación de Montecarlo. Este estudio demuestra la simplicidad conceptual de esta técnica de simulación, la cual, respaldada por la tecnología informática actual, ha ganado una creciente popularidad.

Hormazabal et al. (2019), El artículo presenta una metodología para el análisis y diseño de taludes en roca a escala de banco. El objetivo principal es proporcionar una

guía estandarizada para evaluar la estabilidad de los taludes y tomar decisiones informadas en su diseño. Se destaca la importancia de contar con un procedimiento estandarizado debido a que los taludes en roca son estructuras críticas en proyectos de ingeniería civil y minera, y su estabilidad es crucial para garantizar la seguridad de las personas y las operaciones. La metodología propuesta se basa en la recopilación de información geotécnica y estructural utilizando técnicas como el mapeo de superficie, información de pozos ATV, registro de sondajes y sistemas de escaneo de superficie. Estos datos se utilizan para calibrar los parámetros geométricos y geotécnicos en el diseño de los taludes.

Un aspecto destacado de la metodología es el uso del programa SBLOCK, que permite realizar análisis probabilísticos para evaluar la estabilidad de los taludes. Esto implica considerar las incertidumbres asociadas a los parámetros geotécnicos y obtener resultados más realistas y confiables. En las conclusiones y comentarios finales del artículo, se resalta la importancia de tener una buena correlación entre la información estructural disponible y los resultados obtenidos por el programa SBLOCK. Esto enfatiza la necesidad de recopilar datos precisos y completos para asegurar la confiabilidad de los análisis y diseños de los taludes en roca. En resumen, el artículo presenta una metodología para el análisis y diseño de taludes en roca a escala de banco que se basa en la recopilación de información geotécnica y estructural, y en el uso de análisis probabilísticos. Esta metodología busca proporcionar una guía estandarizada para evaluar la estabilidad de los taludes y tomar decisiones informadas en su diseño.

Kulatilake et al. (2011). El artículo examina la estabilidad de las laderas rocosas en la presa del río Yujian en China. El objetivo es evaluarla utilizando análisis cinemáticos y de teoría de bloques. El sitio tiene diversas laderas rocosas de diferentes tipos y alturas, lo que es crucial para garantizar la seguridad de la presa y la región aguas abajo. Los análisis utilizan orientaciones de discontinuidades y la carga gravitacional para calcular ángulos de pendiente seguros (MSSA) en varias direcciones. Los resultados indican que los MSSA finales del análisis cinemático son similares o menores que los del análisis de teoría de bloques. Según los resultados de la teoría de bloques, se obtienen los siguientes hallazgos: (1) MSSA finales entre 30° y 47° , 44° y 70° , 47° y 69° para diferentes direcciones de pendiente; (2) Amplios rangos de MSSA final para ciertas direcciones de pendiente debido a la variabilidad de orientaciones de fractura; (3) En general, la mayoría de las laderas en el sitio de la presa parecen estables para pendientes menores a 40° , excepto en una región. Se proporcionan comparaciones detalladas entre los análisis

cinemáticos y de teoría de bloques, con implicaciones para el diseño y construcción de presas y proyectos similares en entornos geológicos parecidos.

Greif (2013), Este artículo se analiza la estabilidad de las laderas rocosas en los cimientos de castillos medievales específicos en Eslovaquia. En la primera etapa, se llevó a cabo un análisis estático de 45 laderas rocosas en los castillos, evaluando más de 12.000 bloques potencialmente inestables. Se determinó el factor de seguridad en condiciones estáticas utilizando la teoría de bloques clave a través del módulo Kbslope en el software PTworkshop. Basándose en estos resultados, se realizó un análisis pseudoestático utilizando la aceleración sísmica de acuerdo con las Normas Técnicas Eslovacas para Acciones Sísmicas en Estructuras. Esto se logró calculando vectores de fuerza horizontal en la dirección de la falla por corte, con un componente vertical nulo. Al descartar bloques no finitos y con forma de cuña, se encontró que el 14% de los 12.217 bloques analizados en condiciones estáticas se consideraban inestables. Esta cifra aumentó al 23% bajo condiciones pseudoestáticas, al incluir la aceleración sísmica en los cálculos de estabilidad. Además, se llevó a cabo una evaluación detallada de la estabilidad del castillo de Gyemes en el oeste de Eslovaquia. Esto implicó la identificación de bloques susceptibles de deslizamiento de rocas y la propuesta de métodos adecuados de estabilización, utilizando mediciones de la orientación de conjuntos de juntas obtenidas de una nube de puntos 3D generada mediante el uso de un escáner láser.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Estabilidad de taludes rocosos

La estabilidad de taludes rocosos se refiere a la capacidad de las pendientes o laderas compuestas principalmente de roca para mantener su integridad estructural y prevenir deslizamientos, colapsos o caídas de rocas. Los problemas de estabilidad en taludes rocosos pueden ser preocupantes debido a las posibles consecuencias negativas para la seguridad pública y la infraestructura. Aquí se describen algunos de los problemas comunes asociados con la estabilidad de taludes rocosos:

A. Deslizamientos de rocas: Los deslizamientos de rocas ocurren cuando una masa de roca se desplaza hacia abajo o hacia fuera a lo largo de planos de deslizamiento, a menudo desencadenados por factores como la lluvia intensa, el deshielo, la actividad sísmica o la erosión.

B. Desprendimiento de bloques: Caída de fragmento de rocas debido a la inestabilidad del talud, ya sea por los parámetros geotécnicos del macizo rocoso y/o configuración de

las propiedades de discontinuidades que inciden a que estos bloques se separen de la superficie del talud.

C. Rock fall: Las caídas de rocas son eventos en los que se sueltan fragmentos o bloques de roca de una pendiente y caen hacia abajo, generando energía. Esto puede representar un riesgo significativo para carreteras, vías férreas y otras infraestructuras, así como para personas y vehículos que transitan cerca de la zona.

En la Figura 2, podremos ver un talud de ángulo con pendiente mas de 80 grados con varias discontinuidades presentes, esta configuración origina el problema de desprendimiento de rocas.

Figura 2

Talud con bloques rocosos



Nota: Elaboración propia. Talud con presencia de fracturas casi recto.

2.3.2 Método de análisis Cinemático y Probabilístico

2.3.3 Cinemático

El análisis cinemático, una herramienta en la ingeniería geotécnica geológica, examina la estabilidad de taludes en macizos rocosos fracturados. Su enfoque radica en la orientación y distribución de discontinuidades en la roca, con el fin de evaluar si el talud podría colapsar o deslizarse.

En este análisis, se considera que el macizo rocoso consiste en bloques delimitados por diversas discontinuidades, como fallas, fracturas y estratificación. Estas estructuras son resultado de procesos tectónicos o procedimiento de voladuras que han afectado la roca. La orientación de estas discontinuidades es esencial para determinar el patrón de fracturamiento que limita los bloques.

Para llevar a cabo el análisis cinemático, se comienza por examinar la estructura del corte en el talud. Esto busca identificar si la orientación de las discontinuidades podría causar inestabilidad, conocida como orientación desfavorable del talud en relación con las discontinuidades. Para ello, se emplea la proyección estereográfica en la evaluación de la estructura del macizo rocoso.

En resumen, el análisis cinemático es una técnica que, a través de la proyección estereográfica, se utiliza en la ingeniería geológica para evaluar la posibilidad de deslizamientos o colapsos en taludes de macizos rocosos fracturados. Es una parte crucial en el diseño de estructuras geotécnicas seguras.

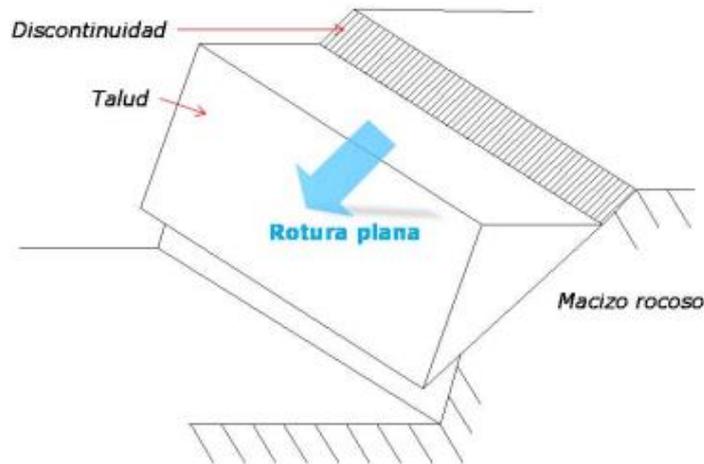
Es una aproximación sencilla a la evaluación de condiciones de la estabilidad en el diseño de las excavaciones en macizos rocosos, con gran control estructural y una distribución no homogénea o isótropo de la discontinuidad, es el análisis cinemático. Este análisis esta basa fundamentalmente en la orientación de las discontinuidades principales y en el ángulo de rozamiento o fricción (Hoek & Bray, 1981, p.105).

- ***Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura plana***

La rotura plana involucra un fallo en taludes rocosos donde una masa terrestre se desplaza en un plano definido por una discontinuidad en la roca. Este tipo de inestabilidad se presenta cuando una masa rocosa se desliza debido a una discontinuidad en el talud. Para que esto suceda, se deben satisfacer condiciones cinemáticas relacionadas con la orientación de la discontinuidad en comparación con el talud y la rugosidad del plano de deslizamiento. Además, es esencial que existan juntas de relevo, como diaclasas laterales o grietas de tracción, que faciliten la separación y deslizamiento de parte de la masa rocosa como se puede observar en la Figura 3.

Figura 3

Rotura plana de talud rocoso

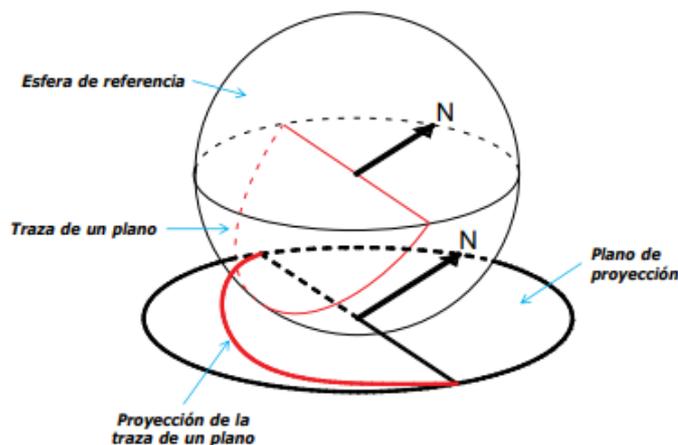


Nota: Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura plano (p.03) por Garzón y Torrijo,2018.

El análisis de la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de los taludes se lleva a cabo utilizando la técnica de proyección estereográfica. Esta herramienta permite examinar la estructura del macizo rocoso en relación con los taludes planificados. En primer lugar, las discontinuidades se consideran como planos para su estudio. La característica principal de una discontinuidad es su orientación, que se define mediante dos parámetros: el buzamiento y la dirección de buzamiento. El buzamiento representa el ángulo formado por la línea de máxima pendiente de la discontinuidad con el plano horizontal, es decir, la inclinación de la discontinuidad con respecto al plano horizontal (Garzón & Torrijo,2018, p.4). La dirección de buzamiento indica el ángulo que dicha línea forma con respecto al norte como se puede observar en la Figura 4.

Figura 4

Representación de un plano en proyección estereográfica



Nota: Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura plano (p.04) por Garzón y Torrijo,2018.

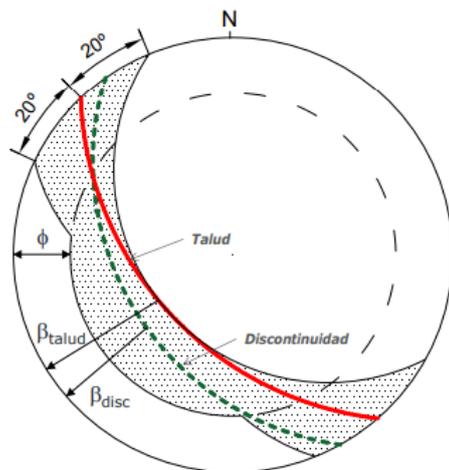
Para obtener estas medidas en campo, se utiliza una brújula de geólogo. Una vez obtenidos los datos de orientación de las discontinuidades, se procede a realizar la proyección estereográfica. Esta técnica permite representar un problema tridimensional en dos dimensiones, facilitando el análisis de las estructuras del macizo rocoso.

Mediante la proyección estereográfica, se pueden identificar patrones y tendencias en la orientación de las discontinuidades, así como su relación con los taludes.

En la Figura 5 se observa la configuración estereográfica de las discontinuidades, se indica el buzamiento y dirección de un talud con línea roja; acorde al ángulo de fricción se representa el área de tipo fallar planar.

Figura 5

Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura tipo planar



Nota. Cualquier discontinuidad que caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de rotura plana (cumple los condicionantes estructurales). Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura plano (p.06) por Garzón y Torrijo,2018.

Esto permite determinar si las discontinuidades y su rugosidad cumplen los requisitos cinemáticos que podrían dar lugar a una rotura plana.

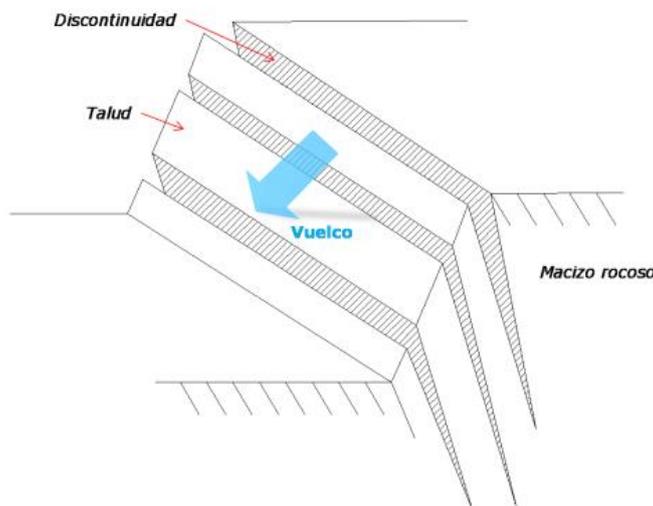
En resumen, la proyección estereográfica es una técnica que permite analizar la orientación de las discontinuidades y su influencia en la estabilidad de los taludes rocosos. Ayuda a identificar posibles mecanismos de fallo y a tomar decisiones en el diseño y ejecución de los taludes para garantizar su estabilidad.

- **Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por vuelco (toppling).**

El mecanismo de fallo en un vuelco (toppling) se produce cuando las discontinuidades existentes en el macizo rocoso generan una serie de bloques o columnas con un buzamiento muy pronunciado y contrario al buzamiento del talud. La rotura se produce por una rotación de dichas estructuras hacia el exterior del talud. En la Figura 6 se observa la configuración discontinuidades, la pendiente del talud y la formación de una falla por vuelco o toppling.

Figura 6

Rotura por vuelco (toppling)



Nota: Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por vuelco (p.03) por Garzón y Torrijo,2018.

El fallo por vuelco ocurre cuando las discontinuidades en la roca forman bloques inclinados en sentido opuesto al talud, lo que resulta en una rotación hacia afuera del talud.

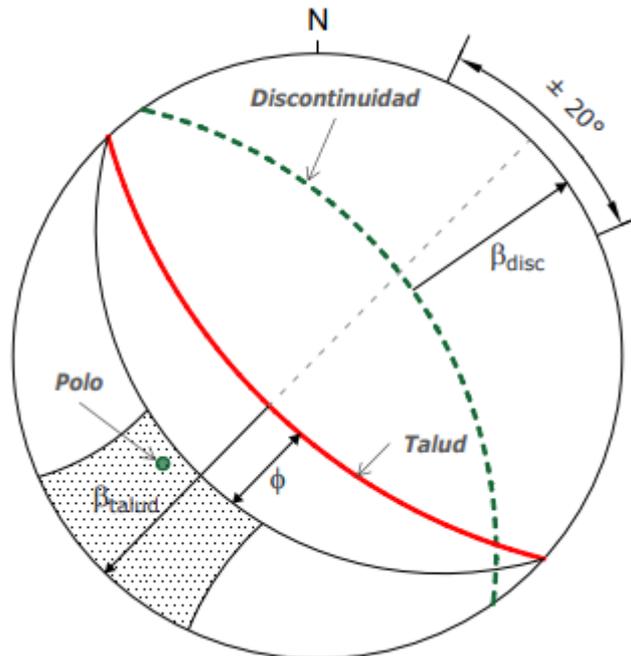
Para que ocurra un vuelco en un talud rocoso, deben cumplirse ciertas condiciones:

- La dirección de las discontinuidades debe ser perpendicular al talud, generalmente dentro de un rango de 160° a 200° respecto al buzamiento del talud.
- La inclinación de las discontinuidades (medida desde la proyección estereográfica) debe ser menor que la inclinación resultante al restar el ángulo de fricción de las discontinuidades del buzamiento del talud.

En la Figura 7 , se representa las condiciones anteriormente mencionadas que permiten que las discontinuidades en la roca generen un mecanismo de vuelco en el talud.

Figura 7

Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por tipo vuelco



Nota. Discontinuidad cuyo polo caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de vuelco (cumple los condicionantes estructurales) Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por vuelco (p.06) por Garzón y Torrijo,2018.

La proyección estereográfica se emplea para examinar la orientación de discontinuidades en un macizo rocoso y cómo afectan la estabilidad de los taludes. Mediante esta técnica, se visualiza y estudia la estructura del macizo en relación con los taludes planificados. Su propósito es verificar si la orientación y rugosidad de las discontinuidades cumplen con los requisitos cinemáticos que puedan conducir a un tipo de inestabilidad denominado vuelco.

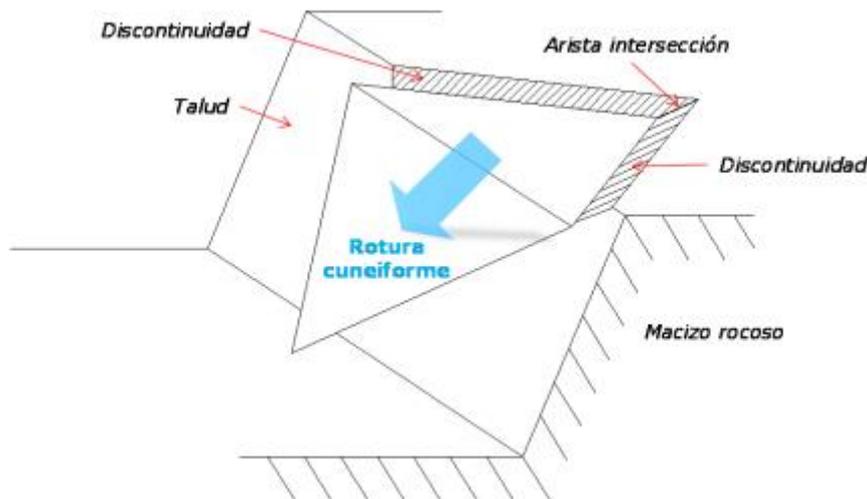
- ***Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por cuña.***

La falla de cuña es un tipo primordial en taludes rocosos, como ilustra la Figura 8. Se presenta cuando el macizo rocoso se desliza respecto al resto a través de dos planos de discontinuidad, haciendo que la línea de corte se reduzca a la mitad fuera de la pendiente, que es siempre el límite entre la masa deslizante y el macizo rocoso. La estabilidad de los taludes rocosos es una consideración de diseño importante infraestructura civil como carreteras o vías férreas. Así por ejemplo la disposición del ferrocarril es común en el sentido de que no discurre completamente sobre el llano, sino más bien que atraviesa

regiones más o menos montañosas para atravesar claros que conducen a la serie de taludes de los que se trata necesarios para asegurar su estabilidad. Existen básicamente tres tipos de inestabilidad de taludes rocosos: fractura plana, fractura en cuña (lengua de flecha) y arqueamiento.

Figura 8

Rotura por cuña (cuneiforme)



Nota: Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura cuneiforme (p.03) por Garzón y Torrijo,2018.

Salvo raras situaciones donde hay macizos rocosos completamente masivo, sin fractura, la mayor parte del macizo rocoso es una colección de bloques de roca limitada tridimensionalmente por un sistema interrupciones Estas interrupciones pueden parecer aisladas (por ejemplo, un caso común de fracaso) o formando familias sistemáticamente (como lecho rocoso, planos o juntas de esquistos) y determina la estructura del macizo rocoso.

Se lleva a cabo un análisis de la orientación de las discontinuidades y su impacto en la estabilidad de taludes mediante una técnica llamada proyección estereográfica. Esta herramienta permite examinar la estructura del macizo rocoso en relación con las pendientes planificadas y determinar si la dirección y aspereza de las líneas de corte de las discontinuidades cumplen con los requisitos cinemáticos que pueden dar lugar a inestabilidades de tipo falla de cuña.

La ocurrencia de falla de cuña fija depende geoméricamente (dipping) para cortar líneas de roturas. en relación con una pendiente decreciente. Además, solo se desliza mecánicamente puede ocurrir cuando la fuerza de fricción se excede en niveles deslizarse.

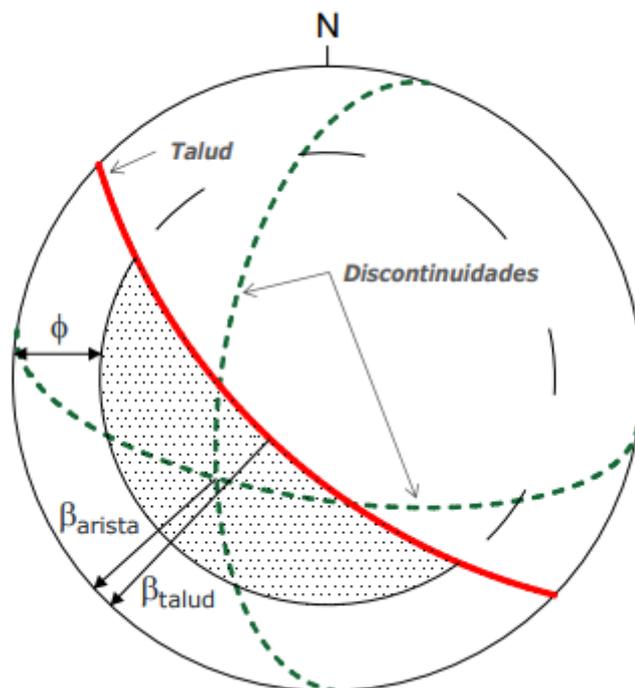
Es importante tener en cuenta que el análisis cinemático debe realizarse independiente para cada línea de intersección observada (que puede ser el resultado del mestizaje o agrupación discontinua de diferentes géneros) y para cada talud estudiado, porque probablemente sólo en el macizo rocoso algunas intersecciones existentes corren el riesgo de fallar en forma de cuña. Por lo tanto, para que la cuña se rompa, debe ocurrir lo siguiente: dos condiciones estructurales representadas gráficamente en la Figura 9:

La línea de corte debe crearse en la superficie de la pendiente para que el golpe (dirección) debe ser "similar" a la dirección de caída (en cambio, no debe ser en la dirección opuesta elevación este) y su buzamiento debe ser menor que pendiente.

La unión de la línea de corte debe ser mayor que el ángulo de rozamiento de superficies deslizantes (en general ángulo de fricción o fricción entre dos discontinuidades; si estos valores son muy diferentes, puedes hacer un promedio).

Figura 9

Análisis cinemático de la estabilidad de un talud en roca por rotura cuneiforme



Nota. Cualquier intersección que caiga dentro de la zona sombreada presenta riesgo potencial de rotura cuneiforme (cumple los condicionantes estructurales) Tomado de Análisis cinemático de la estabilidad de taludes en roca por rotura cuneiforme (p.06) por Garzón y Torrijo, 2018.

2.3.4 Probabilístico

Método de Keyblock

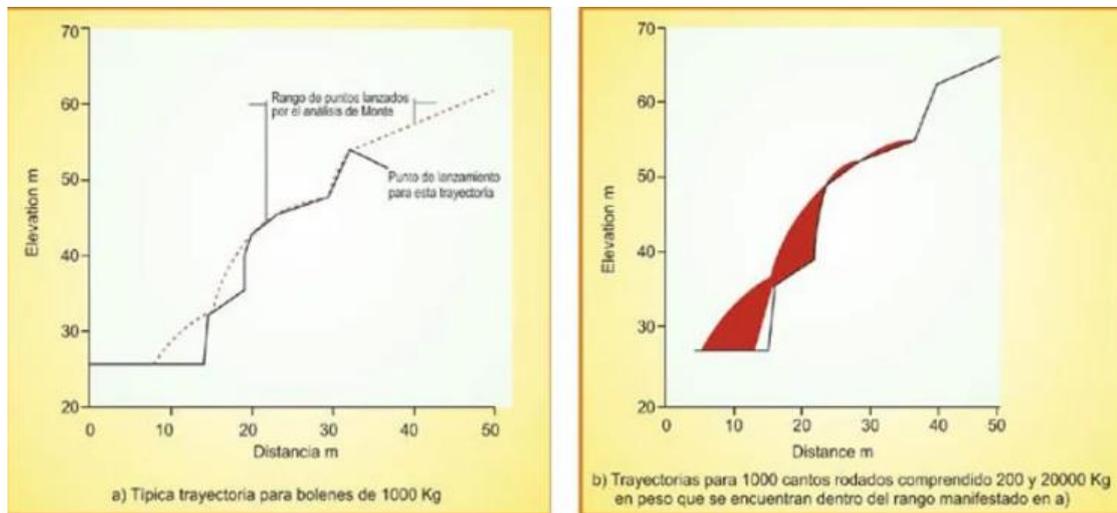
La implementación del método de Keyblock en Sblock permite evaluar bloques de cualquier forma convexa (visualizando la Figura 10). los boques pueden fallar por deslizamiento en dos planos o deslizamiento en un solo plano, según la forma y la ubicación en relación con la cara libre de la pendiente del banco. El método de Keyblock es usado para identificar la posibilidad de retirar los taludes. Una vez removido la estabilidad, el programa utiliza métodos vectoriales para determinar la dirección de deslizamiento, las fuerzas normales y de corte en los planos de deslizamiento y el factor de seguridad del bloque. El deslizamiento puede ocurrir a lo largo de un solo plano (falla plana) o a lo largo de dos planos (falla de cuña) y a veces a lo largo de tres planos (falla de bloque).

Las discontinuidades de en la roca delinear bloques que están dentro del talud rocoso. Cuando se crea una excavación, estos bloques quedan expuestos en la superficie excavada. Keyblock es un bloque que puede desplazarse en una excavación sin ser obstruida por la roca. Esta teoría muy importante desde el punto de vista de la estabilidad, porque normalmente son los primeros bloques que se liberan en la excavación. Dichos bloques representan un riesgo operativo y de seguridad y son de intereses fundamentales en el diseño de excavaciones.

Al diseñar excavaciones en rocas fracturada, es importante identificar la cantidad y el tamaño de los posibles bloques en las paredes de excavación. Una vez que se han identificado lo bloques clave, es necesario establecer si es probable que sean estables o si pueden deslizarse dentro de la excavación por gravedad. El conocimiento de las orientaciones y longitudes de discontinuidad es necesario para identificar posibles bloques clave. Se debe conocer la orientación de los posibles plano de deslizamiento y la resistencia al deslizamiento para realizar un análisis de estabilidad de los bloques.

Figura 10

Izquierda sección típica de análisis de caída de roca. Derecha ejemplo de trayectoria de caída de rocas.



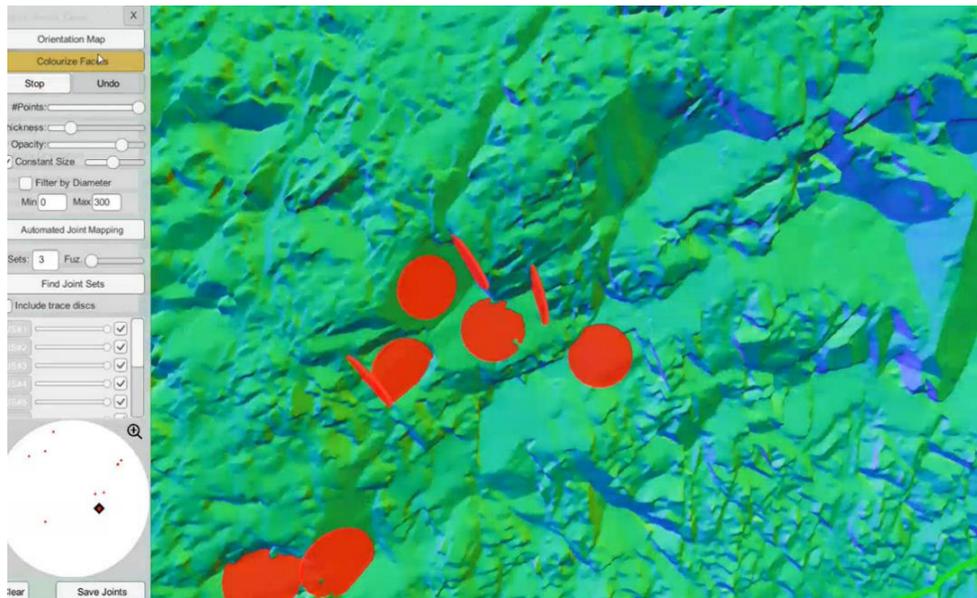
Nota. Tomado de Análisis de caída de rocas en taludes (p.01) por seguridad minera,2015.

2.3.5 Estabilidad de taludes mediante software

EASY MINER XR: Obtenga una visión clara de su proyecto utilizando tecnología topográfica avanzada. Utilice datos de múltiples sensores, como escáneres láser UAV y Lidar, para una planificación precisa. Calcule volúmenes y evalúe riesgos geotécnicos que puedan afectar carreteras, accesos y estructuras. En la Figura 11 se visualiza la interfaz sencilla del software y las aplicaciones.

Figura 11

Programa Easy Miner XR



Nota: Elaboración propia. Identificación de discontinuidades en un talud en EasyMiner.

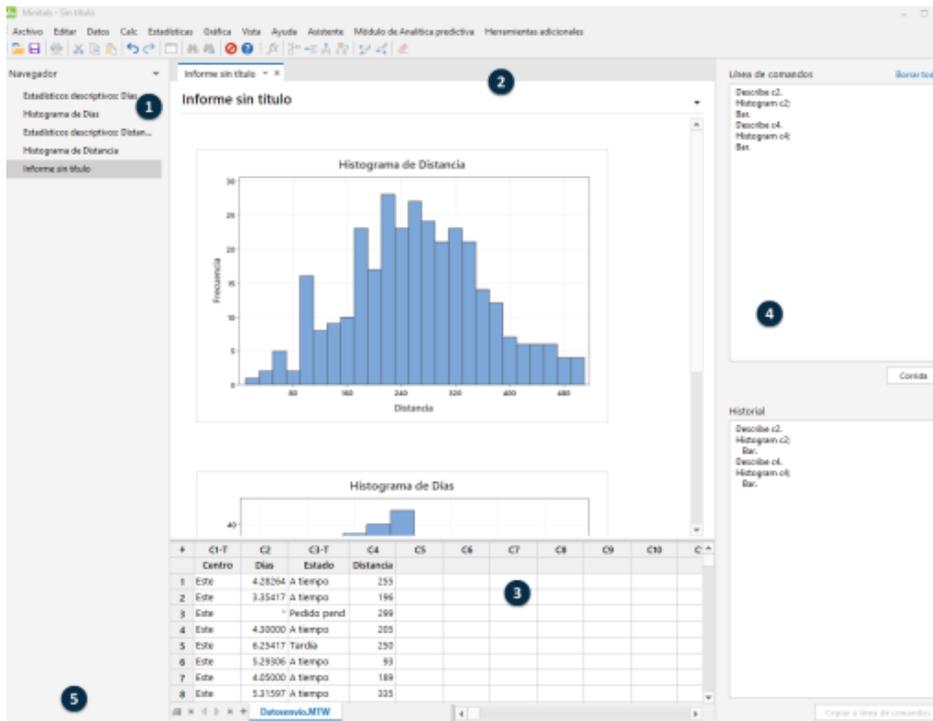
Verificación de data de familias: Minitab

Minitab permite realizar análisis estadístico mediante una serie de pasos, con frecuencia orientados por un conocimiento previo del área de estudio de taludes. En la Figura 12 se muestra la visualización estadística de datos para luego analizar.

- Explora datos con gráficos y presenta resultados
- Realizar análisis estadístico
- Diseño de taludes

Figura 12

Programa Minitab



Nota: Elaboración propia. Histograma de datos realizado en Minitab.

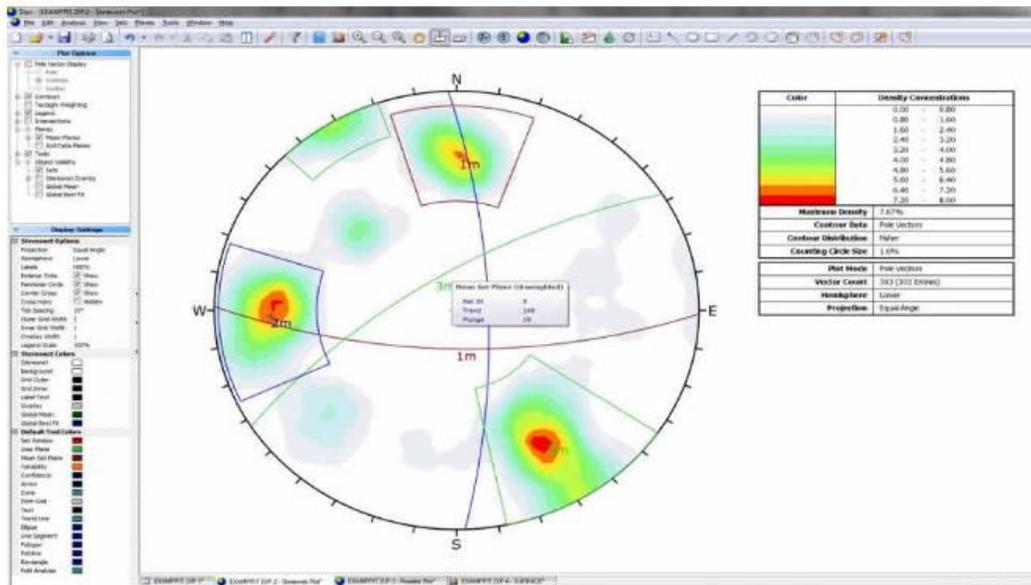
DIPS 6.0: Software geotécnico

Dips permite el análisis y visualización de datos estructurales usando técnicas similares a estereoscopios manuales. Además, ofrece numerosas capacidades computacionales, como estadísticas de agrupación de orientación, orientación promedio, cálculo de confiabilidad, variabilidad de conglomerados, análisis cinemático, y evaluación de atributos cualitativos y cuantitativos.

Dips se enfoca en el análisis de características relacionadas con la ingeniería de estructuras de roca. No obstante, su formato de datos flexible permite analizar diversas orientaciones de base. En la Figura 13 se enseña la representación de las discontinuidades en un sistema estereográfico, indicando las familias respectivas.

Figura 13

Programa DIPS 6.0



Nota. Elaboración propia. Simulación de familias datos no reales en Dips.

Programa para análisis probabilístico: Sblock

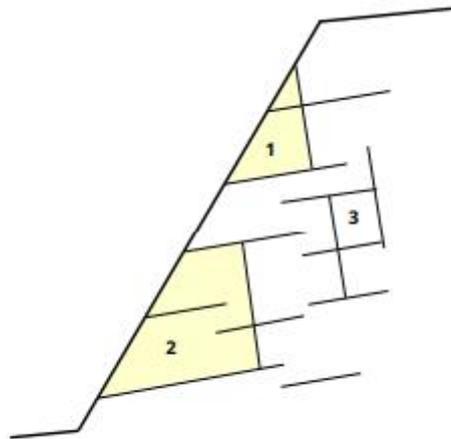
Sblock no es un programa que solo considera un bloque a la vez e intenta reconstruir todo el bloque entrelazado. Reconstruimos un bloque a la vez duplicando la longitud y la dirección de las huellas observadas y proyectando el plano discontinuo sobre la roca para determinar si se formó el bloque. Con este enfoque, solo es necesario conocer las distribuciones de longitud de traza, distancia y orientación conjunta para realizar un análisis de Sblock. Estos parámetros se pueden observar directamente mapeando una línea de exploración estándar de la superficie de perforación.

En principio, Sblock construye un bloque a la vez colocando vías de conexión en la pendiente del terraplén y determinando si las vías se cruzan para formar un bloque. Las trazas se seleccionan en función de la frecuencia aparente de cada conjunto de nodos en la superficie del terraplén (véase la Figura 14). Cada trazo pertenece a un conjunto y se le asigna una orientación aleatoria y una longitud de trazo tomada de las estadísticas del conjunto. Se supone que el espaciado de las juntas y la longitud de la traza siguen una distribución exponencial negativa truncada. Se supone que las propiedades de dirección y resistencia de las conexiones siguen una distribución normal. La posición e intersección de los escalones se consideran para determinar si el bloque se perfila al frente de excavación. Considerando la posición de la superficie de la junta a lo largo de la línea de

intersección de las huellas expuestas en la superficie de excavación, consideramos la posibilidad de que exista un plano de corte en el macizo rocoso que limite la extensión del bloque.

Figura 14

Programa Sblock



Tipos de bloques en una pendiente; (1) bloques clave; (2) bloques removibles con caras paralelas; (3) bloques de juntas

Nota. Tomado de Bench berm design using probabilistic Keyblock Analysis (p.03) por Hormazabal, 2013.

2.4 Definición de términos básicos

Análisis Probabilístico: Estas evaluaciones permiten calcular la posibilidad de que una estructura falle y proporcionan un alto nivel de confianza en su planificación. Esto posibilita medir la inseguridad presente en el trabajo al conocer previamente las probabilidades de fallo. La ventaja del enfoque probabilístico en la planificación de estructuras geotécnicas radica en que el diseñador puede predefinir la probabilidad de fallo en función de la importancia y la duración de la estructura. (Brizuela, 2017).

Análisis Cinemático: El análisis cinemático se enfoca en investigar fracturas y separaciones en formaciones rocosas o suelos. Se examina la dirección, disposición y categoría de estas discontinuidades sin tener en cuenta las fuerzas involucradas. El propósito es entender su impacto en la estabilidad de estructuras geotécnicas, como taludes y pendientes, particularmente en relación con movimientos de masa como deslizamientos o colapsos, sin adentrarse en las causas (Garzón & Torrijo, 2013).

Fotogrametría con Drones: Facilita obtener datos topográficos detallados del terreno, que posibilitan la creación de mapas precisos, mediciones de dimensiones y modelado en 3D,

ofreciendo ventajas notables en seguridad, tiempo y costos (Instituto Geofísico del Perú, 2020).

Data Estructural: Se refiere a roturas que ocurren naturalmente en la roca como planos de estratificación, diaclasas y fallas, que generalmente se denominan discontinuidades. Las propiedades de las discontinuidades relativas a la estabilidad incluyen orientación, persistencia, aspereza y relleno. La importancia de las discontinuidades es que son planos de debilidad en el mucho más fuerte, roca intacta, por lo que la falla tiende a ocurrir preferentemente a lo largo de estas superficies. las discontinuidades pueden influir directamente en la estabilidad de los taludes. (Wyllie & Mah,2004, p. 22)

Factor de Seguridad (FS): Estabilidad cuantificada por equilibrio límite del talud, que es estable si $FS > 1$. (Wyllie & Mah,2004, p. 10).

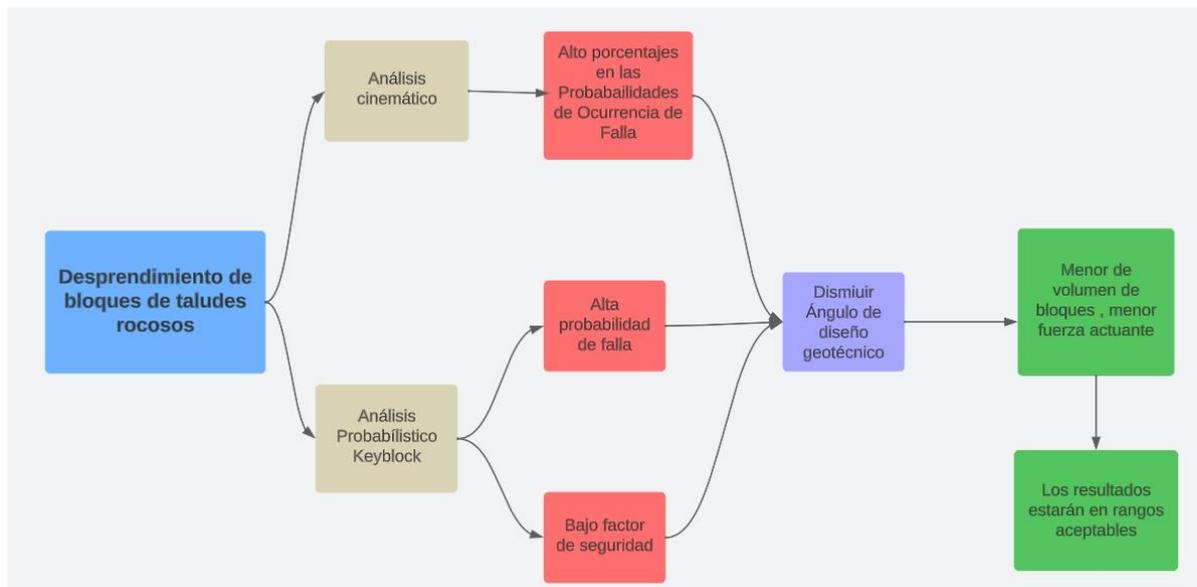
Probabilidad de falla (PF): Estabilidad cuantificada por distribución de probabilidad de diferencia entre las fuerzas que resisten y las que desplazan, que se expresan como probabilidad distribuciones (Wyllie & Mah,2004, p. 10).

2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis

El diseño de talud banco-berma es muy importante en taludes rocosos, por ello se emplea dos métodos de análisis para estimar el desprendimiento de caída de bloques y realizar las recomendaciones geotécnicas. A continuación, en la Figura 15 se presenta un esquema guía para lograr los objetivos de esta tesis.

Figura 15

Mapa Conceptual que sustenta la hipótesis



Nota. Elaboración propia. Sustentación de hipótesis.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 *Hipótesis general*

Al reducir los ángulos de diseño geotécnico mediante el análisis Cinemático y Probabilístico se disminuye el riesgo de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima Canta tramo km.23+700 a km.23+770.

3.1.2 *Hipótesis específicas*

- ✓ Al generar el modelo fotogramétrico 3D se obtiene data estructural de las discontinuidades.
- ✓ Se verifica que las probabilidades de ocurrencia de falla mediante el análisis cinemático presentan valores inestables para el talud de bloques rocosos.
- ✓ Se demuestra que la probabilidad de falla y factor de seguridad mediante el análisis probabilístico presentan valores inestables para el talud de bloques rocosos.
- ✓ Al reducir los ángulos de diseño geotécnico se disminuye los resultados de los análisis cinemático y probabilístico.

3.2 Sistema de variables

3.2.1 *Definición conceptual y operacional*

✓ Variable Independiente

La variable independiente de la presente investigación es Ángulo de diseño geotécnico debido a que permite analizar sus propias características y evaluar su efecto en el estudio.

✓ Variable Dependiente

La variable dependiente de la presente investigación es Desprendimiento de caída de rocas ya que mide los resultados de un adecuado ángulo de diseño geotécnico mediante los resultados obtenidos del análisis cinemático y probabilístico.

En la Tabla 1 se desarrolla la operacionalización de las variables independiente y dependiente mencionando sus dimensiones, indicadores, índices e instrumentos.

3.2.2 Operacionalización de las variables

Tabla 1

Operacionalización de las variables

Variable	Dimensiones	Indicadores	Índices	Instrumentos
INDEPENDIENTE	Estabilidad de Taludes Rocosos	Estructuras	Buzamiento y Dirección de Buzamiento	Fichas técnicas de Recolección de Datos
		Esfuerzos	Modelo Numéricos	
		Condiciones de Hidrogeología	Permeabilidad	
		Geología Estructural	Litología	
	Condiciones geotécnicas y Geológicas	Discontinuidades	Grupos de familias	
		Macizo Rocosos	Clasificación RMR	
	Experiencia técnica	Supervisión de Obra	Calidad de Construcción	
		Interpretación de datos	Ensayos	
		Condiciones Locales	Sismos	
		Propiedades	Dip, Dip	
Desprendimiento de caída de rocas	Data estructural	Índices de Discontinuidades	Direction, espaciamiento y persistencia	Programas Computacionales para Geotecnia
	Probabilidad de ocurrencia de falla	Tipo de falla	Falla por cuña, deslizamiento, vuelco	
	DEPENDIENTE			

Probabilidad de falla	Parámetros Geotécnicos	Cohesión, Ángulo fricción, Altura de talud
Factor seguridad	de Parámetros Geotécnicos	Cohesión, Ángulo fricción, Altura de talud

Nota. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

4.1 Método de investigación

La presente investigación aplica metodología deductiva porque se plantea evaluar el ángulo de diseño de los taludes para disminuir el desprendimiento de caída de rocas, de este modo se plantea la relación causa-efecto de variable independiente a dependiente. Permite obtener conclusiones lógicas y específicas a partir de premisas con fundamento teórico.

La tesis es aplicada debido a que se orienta en la aplicación práctica de conocimientos teóricos. En este caso se busca el ángulo adecuado de diseño de taludes en carreteras, solución técnica que mejora la calidad de vida humana con la finalidad de minimizar el desprendimiento de bloques de rocas, problema recurrente en vías del país

El enfoque es cuantitativo debido a que se extrae conclusiones a partir de resultados numéricos. Se recopiló datos con la ayuda de instrumentos de medición estandarizados para describir patrones y tendencias.

4.2 Tipo de la investigación

El tipo de investigación es explicativa porque se expone los motivos del problema, se comprende las causas y busca dar soluciones para mitigar el problema.

Es descriptivo debido a que se detalla la realidad problemática para someterlo a análisis, rediseñar los ángulos de diseño geotécnico de los taludes para disminuir el desprendimiento de rocas a base de bibliografía de tesis y artículos.

4.3 Nivel de la investigación

Esta investigación corresponde a un nivel descriptivo porque menciona las características de las variables, busca determinar la relación causa-efecto. El nuevo ángulo de diseño geotécnico que es la causa y el efecto el desprendimiento de rocas. Se obtienen resultados con grado de alto de confiabilidad que permite validar las hipótesis.

4.4 Diseño de la investigación

El diseño de la tesis será no experimental por qué se describe las características de las variables sin manipulación de estas. Es diseño transversal dado que los datos se medirán solo en un tiempo específico. El estudio es prospectivo porque se va a recolectar datos actuales para la creación de posibles escenarios futuros.

4.5 Población y muestra

4.5.1 Población

En la presente investigación, la población está orientado a los taludes rocosos del Perú que son objeto para analizar para evaluar el desprendimiento de caídas de rocas.

4.5.2 Muestra

La muestra sería los taludes rocosos de la carretera Lima-Canta del km.23+700 a km.23+770 que presentan potencial probabilidad de desprender bloques de rocas.

4.6 Técnicas e instrumentación de recolección de datos

4.6.1 Instrumento de recolección de datos

La recolección de datos se recaudó en campo a través de fotografías de alta resolución con drone para después procesarlo en software especializado y generar la data estructural. Para información geotécnica y geológica del sector de los taludes se utilizará la revisión de estudios previos.

Los programas computaciones de cálculo que serán utilizados como instrumentos Pix4Dmapper, EasyMiner XR, Dips y Sblock.

4.6.2 Métodos y técnicas

- ✓ Observación Directa: Se registra los aspectos y eventos relevantes del lugar de estudio por inspección visual. De manera no participante porque el investigador no interviene, solo observa.
- ✓ Obtención de información de campo: Realizar fotografías de alta resolución el con drone y generar el modelo fotogramétrico 3D del sector analizado.
- ✓ Análisis documental: La recopilación de tesis, artículos y estudios previos en la zona para obtener información geotécnica, geológica y técnica necesaria para el desarrollo del estudio.

4.7 Descripción de procesamiento de análisis

- ✓ Realiza un vuelo programado con drone en el tramo evaluado de la carretera, para obtener fotografías aéreas de alta resolución.
- ✓ En el software Pix4Dmapper se genera el modelo fotogramétrico 3D a partir de las fotografías aéreas.
- ✓ En el software Easyminer XR se obtendrá la data estructural del macizo rocoso a través del modelo fotogramétrico 3D, como dip, dip direction persistencia y espaciamiento de las fracturas.
- ✓ En el software Dips se determina FS y probabilidad de ocurrencia de falla.
- ✓ En el software Sblock se determina el FS y la PF.

- ✓ Se simula ángulos geotécnicos para lograr un FS estable y PF muy baja.
- ✓ Finalmente se determina el nuevo ángulo geotécnico del talud del tramo.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADO

5.1 Presentación del caso

En las carreteras del Perú hay zonas de inestabilidad de taludes rocosos, el desprendimiento de bloques es probable a suceder y ocasionar accidentes vehiculares o bloqueo temporal en las vías, ocasionando retrasos de tiempo en las actividades sociales y económicas. Es una preocupación importante debido a la topografía accidentada y a la presencia de diversas condiciones geológicas. Por lo cual, se requiere análisis y estudios geotécnicos con alto nivel técnico que garanticen la estabilidad permanente de los taludes. En la carretera Lima-Canta se visualiza taludes rocosos en condición de desprendimiento de bloques ya sea por presencia de discontinuidades desfavorables, fallas geológicas, roca blanda, sismicidad, condiciones climáticas, etc. Nuestra área de estudio es visible observar desprendimiento de bloques en las banquetas de la carretera, mayormente por falla planar y formación de cuñas. Estos bloques de roca obstaculizan la vía de transporte ocasionando algunos inconvenientes, deteniendo la fluidez de los carros, realizando constantes limpiezas por tramos, que se ha ido visualizando.

Figura 16

Condiciones del talud estudiado



Nota: Elaboración propia. En el lado izquierdo hay presencia de desprendimiento de bloques y por la derecha se observa la formación de discontinuidades en el talud.

En este caso se requiere un levantamiento de la data estructural del área con la aplicación de un software especializado para determinar las propiedades índices de las

discontinuidades. Luego se realiza análisis cinemático, que va identificar cual es el tipo de falla presente y que familias de estructuras lo generan. Así como, la elaboración de análisis probabilístico para obtener el factor de seguridad y la probabilidad de falla en caídas de rocas. Finalmente, obtenidos los resultados se le asignara un nuevo ángulo de inclinación a nuestro talud estudiado para obtener una estabilidad natural siendo un método rápido y económico.

5.2 Ubicación

La ubicación del talud analizar se encuentra en la carretera Lima-Canta es el km 23+700 a km+770 con coordenadas UTM por el norte con 8707154.56 m S y con el Este 294701.56 m E en la zona 18L del territorio peruano. En la Figura 17 se podrá visualizar la zona de estudio tomado desde un plan de Vuelo no tripulado (Drone), con el fin de mostrar la peligrosa zona donde cae bloques de rocas de diferentes tamaños.

Figura 17

Fotografía panorámica del talud en la carretera



Nota: Elaboración propia. Fotografía realizada con drone.

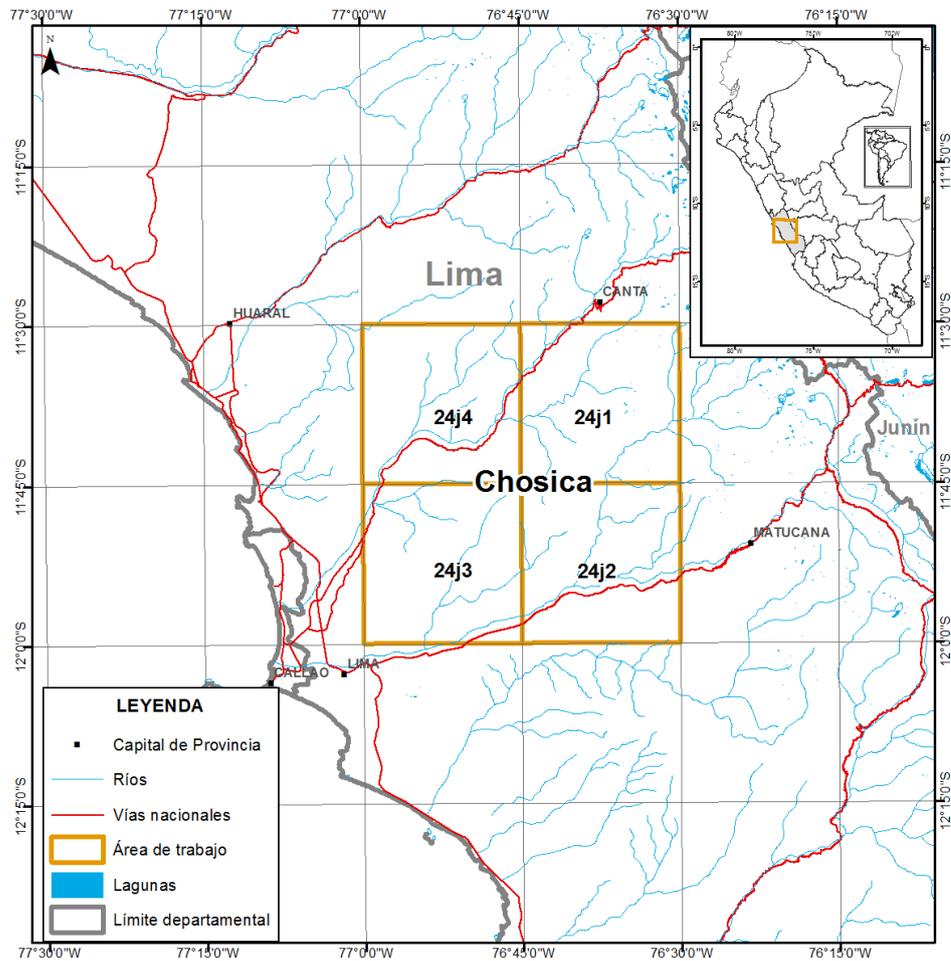
5.3 Geología Regional

Nuestra zona de estudio se ubica en el cuadrángulo 24j Chosica de la carta nacional peruana. Este sector se ubica en la costa central abarcando las zonas de Lima, Huaral y Canta, como muestra la Figura 18.

A esta zona se puede acceder a través de la carretera Central Lima -Cocaracha y carretera Lima Canta.

Figura 18

Mapa de ubicación del cuadrángulo Chosica-24j

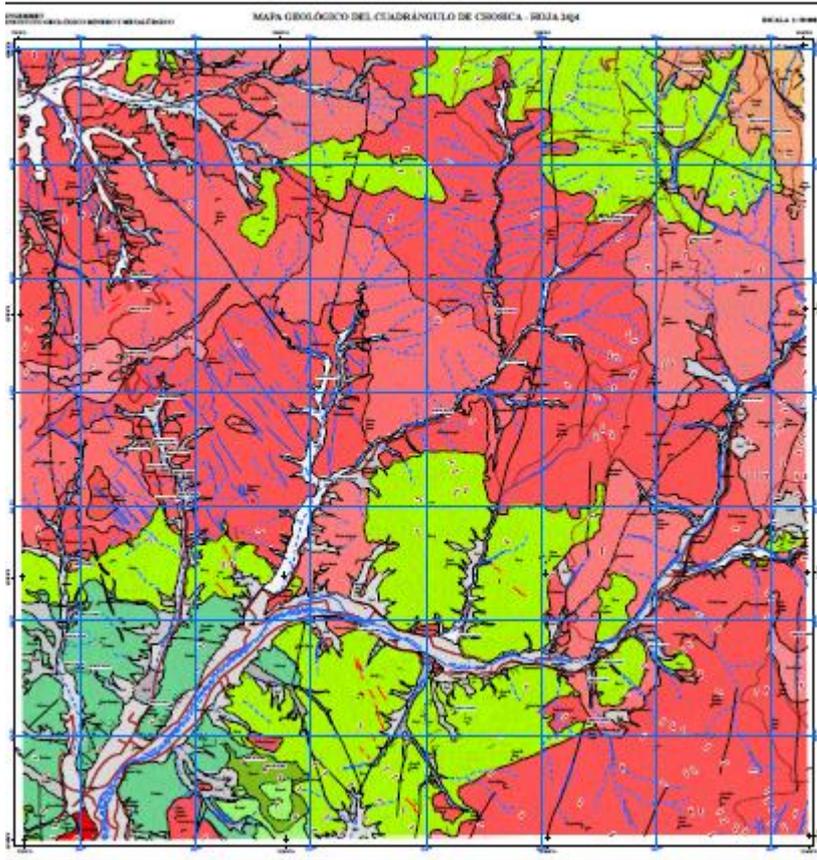


Nota: Tomado de *Geología del cuadrángulo de Chosica*, (p.10), por Ingemmet (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), 2021.

Nuestra área de estudio corresponde al sector 24j-4; que abarca los distritos de Comas, Carabayllo; las zonas de Trapiche, Yangas y Santa Rosa de Quives; aproximadamente hasta el km.80 de la carretera Lima Canta (véase Figura 19). Por encima de ese sector se ubica el cuadrángulo de Canta, que aborda la provincia del mismo nombre y se describe la geología respectiva.

Figura 19

Mapa de geología regional del sector Chosica 24-j4



Nota: Tomado de *Geología del cuadrángulo de Chosica*, (Mapa L038_04), por Ingemmet (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), 2021.

Según Ingemmet (2021) este sector se encuentran diversas unidades litoestratigráficas que abarcan desde el período Cretácico hasta la época actual. Estas unidades están compuestas por secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias de origen volcánico cretácicas pertenecientes al Grupo Casma, las cuales se dividen en tres formaciones principales: Yangas, Huarangal y Quilmaná. Además, se encuentran secuencias de rocas carbonatadas que forman parte de la Formación Arahuay. (p.15)

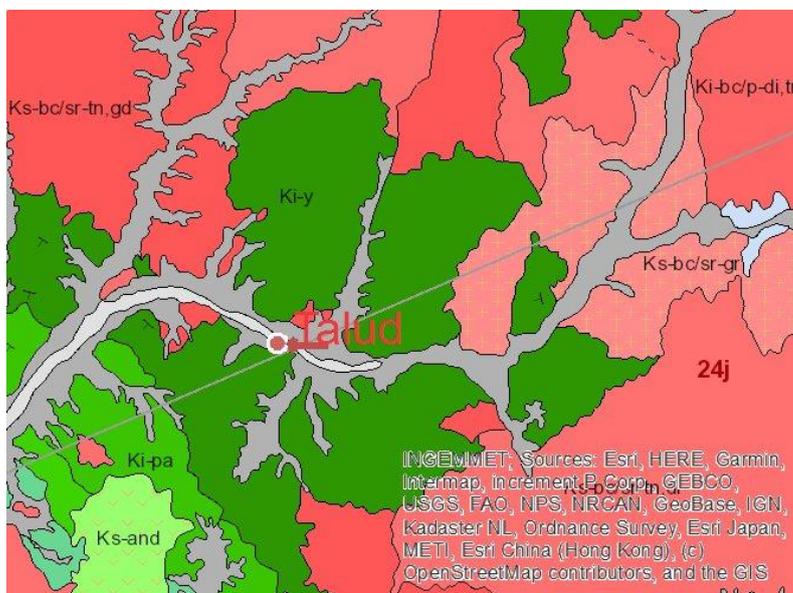
Según Ingemmet (2021) menciona que la Formación Yangas se encuentra en el centro y oeste del cuadrángulo de Canta, con afloramientos identificados en diversas ubicaciones, incluyendo el cerro Colorado en el suroeste del sector 24j1, la quebrada Colca en el noroeste de la hoja 24j2, la parte alta de la quebrada Yerba Buena en la lámina 24j3, y varios lugares como cerro Portillo, El Reloj, Yangas, Panteón, Aparca y Callan, así como las quebradas Río Seco, Pucara, Carrizal y los poblados de Yangas y Puruchuco en la hoja 24j4. Desde el punto de vista litológico, esta formación comprende principalmente

lutitas, areniscas y calizas, con una presencia menor de lavas y brechas volcánicas. Además, se ve afectada por intrusiones del Batolito de la Costa, junto con diques y sills félsicos y máficos. (p.17)

La Formación Huarangal se limita al sector suroeste y noreste en los cuadrantes 24j4 y 24j3, respectivamente, en localidades como Trapiche, Tres Unidos y Macas a lo largo del valle del río Chillón. Su composición incluye principalmente areniscas volcanoclásticas, lavas andesíticas, brechas, y en menor medida, lutitas y calizas. Finalmente, la Formación Quilmaná abarca gran parte de la hoja 24j3, el suroeste de la hoja 24j4 y el sur de la hoja 24j2. En su mayoría, está compuesta por lavas y brechas volcánicas.

Figura 20

Mapa de geología local del sector estudiado



Nota: Adaptado de *Geología del cuadrángulo de Chosica*, (Mapa L038_04), por Ingemmet (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), 2021.

En la Figura 20 se observa que el punto rojo es el talud en estudio, es parte de la Formación Yangas (KI-y). Esta unidad fue descrita por Palacios et al. (1992) en las inmediaciones del poblado Yangas como una secuencia volcánica-sedimentaria que comprende lavas andesíticas masivas, lodolitas y margas silicificadas con ftanitas y chert blanco y oscuro, intercalando con limolita, areniscas de grises y negras.

En las proximidades del poblado Yangas y el cerro El Reloj, encontramos una formación compuesta mayormente por lavas de andesita y basalto, con intercalaciones de capas sedimentarias. Estas capas sedimentarias tienen un espesor aproximado de 100 metros,

seguidas por secuencias bien estratificadas que abarcan al menos 450 metros. Estas secuencias incluyen areniscas grises, lutitas y limolitas en estratos que varían entre 5 cm y 15 cm de espesor, a veces con laminación, y se ven afectadas por intrusiones de sills y diques compuestos mayoritariamente de andesita con espesor de 5 metros.

Por otro lado, al este superior se observan afloramientos en las cercanías de Puruchuco y Huamantanga. En esta área, la formación está caracterizada por capas de areniscas tobáceas y una abundancia de capas de chert bandeadas y calizas.

Figura 21

Presencia del tipo de roca en el talud



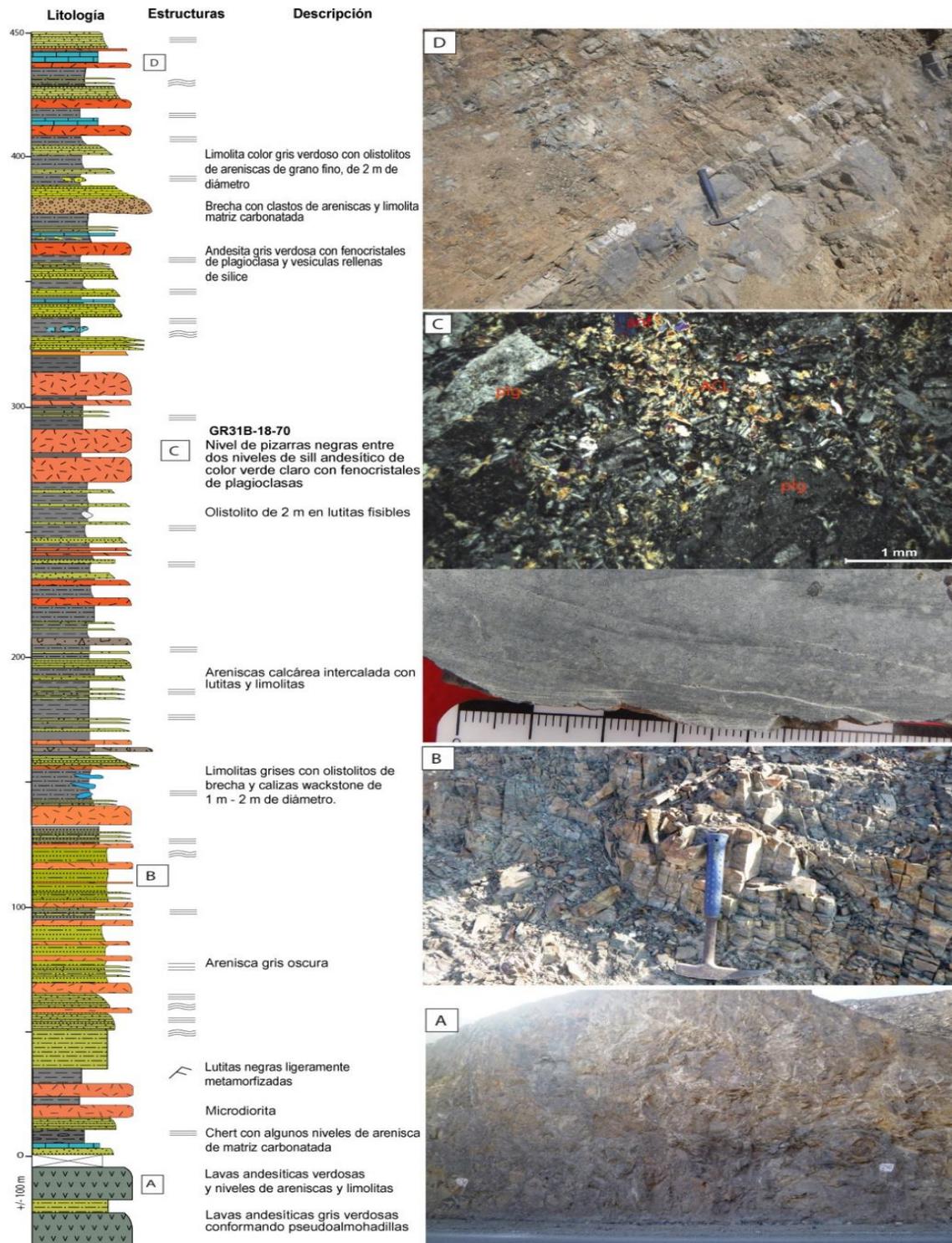
Nota. Elaboración propia. En el talud se observa un solo tipo de estrato rocoso.

En la Figura 21 se nota que en el talud solo hay un tipo de estrato, en los 20 metros de altura. Roca dura con matices grises, no hay presencia de fallas ni pliegues.

En la Figura 22 se observa la columna litológica de la formación Yangas, y en la imagen B podemos observar una roca similar a la zona de estudio. Por lo tanto, concluimos que el único estrato superficial presente es roca arenisca gris oscura.

Figura 22

Columnas litológicas en el cuadrante 24-j4



Nota: Tomado de *Geología del cuadrángulo de Chosica*, (p.43), por Ingemmet (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico), 2021.

5.4 Zonificación sísmica del sector analizado

En la Figura 23 se demuestra que el talud se ubica en la zona 4 del mapa sísmico del Perú. Le corresponde una aceleración a este sector de 0.45g. Sin embargo, para diseño geotécnico se considera el 50% de este valor; es decir 0.23g.

Figura 23

Mapa de actividad sísmica del Perú



Nota: Tomado de Norma E.030 Diseño Sismorresistente (p.05) por Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2016.

5.5 Obtención de data estructural

5.5.1 Vuelo programado

Se realizó un vuelo programado con dron DJI Phantom 4 Pro v.2 entre las progresivas km.23+700 a km.23+770 de la carretera Lima Canta, la trayectoria del barrido del dron se visualiza con un área rectangular de color blanco en la Figura 24.

Figura 24

Área de detalle del barrido del vuelo programado



Nota: Elaboración propia. El área rectangular blanco al pie del talud, es el área de barrido.

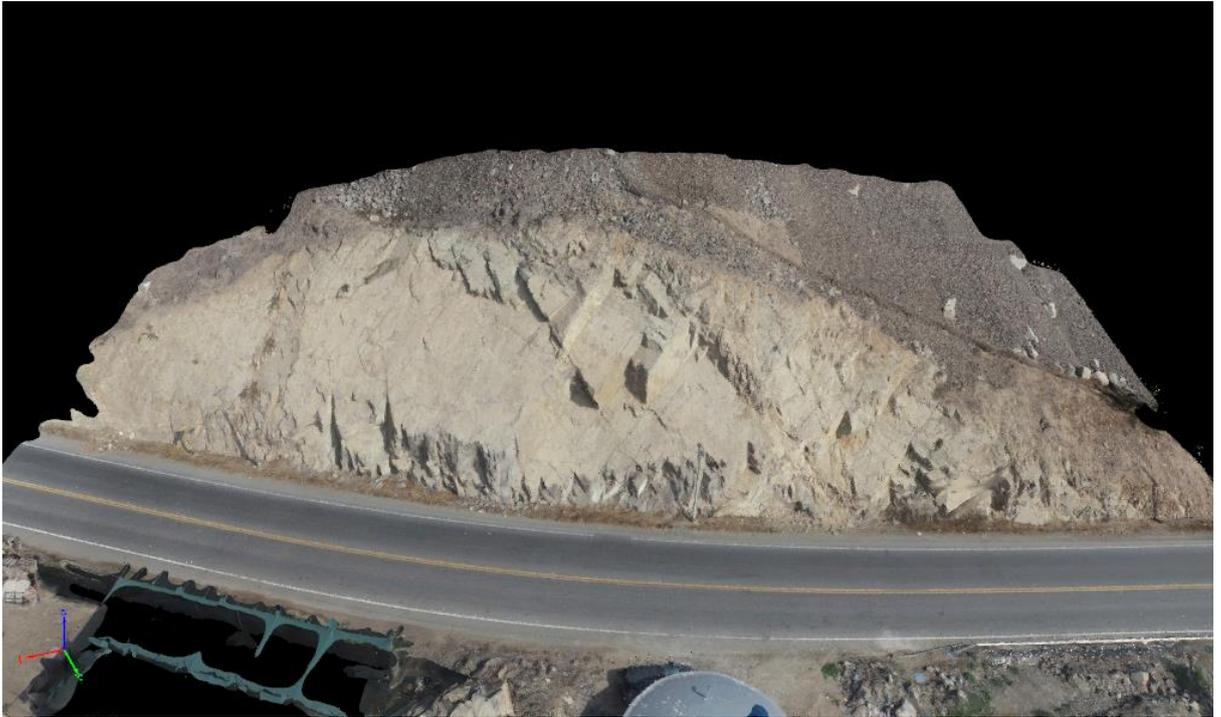
El vuelo programado recorre a 1 m/s, con ángulo de inclinación de cámara a 45° respecto al talud. Para obtener fotografías a alta resolución se volará a una altitud de 35m, plan de vuelo de doble grilla para generar fotos con información 3D y un traslape entre las misma de un 80% de esta forma se entrega imágenes visibles de las discontinuidades del macizo rocoso.

5.5.2 Modelo fotogramétrico 3D

Se ha tomado 92 fotografías del talud en estudio. En la Figura 25, se muestra el modelo fotogramétrico 3D generado en el software Pix4D Mapper. En este modelo se aprecia las discontinuidades del macizo rocoso.

Figura 25

Modelo fotogramétrico 3D del talud analizado



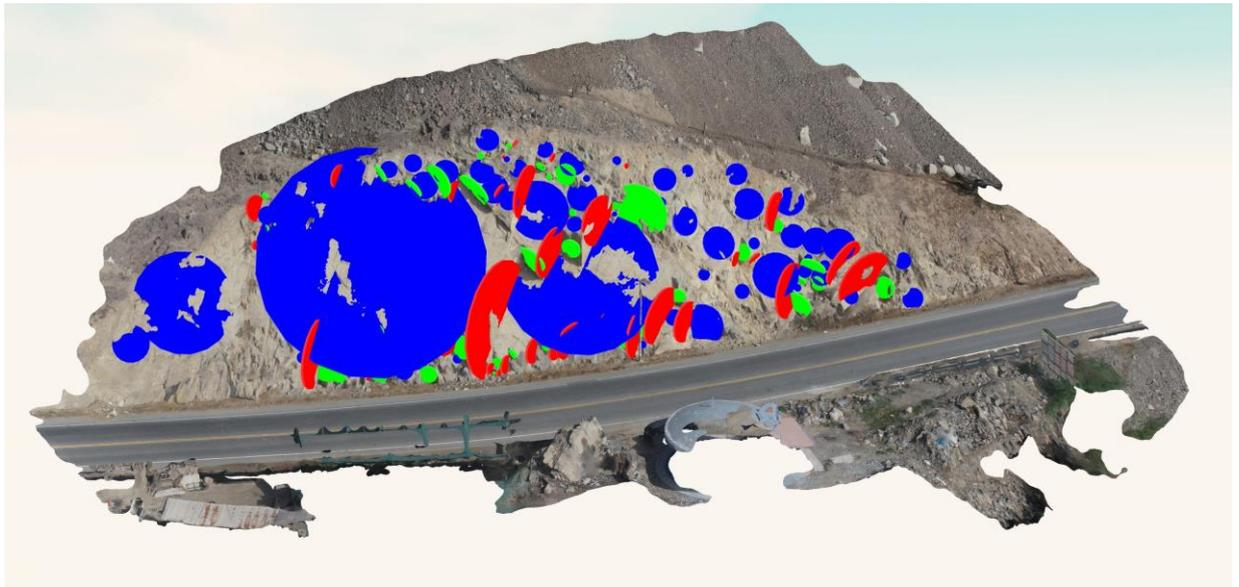
Nota: Elaboración propia. Talud de estudio

5.5.3 Data estructural

Finalmente, en el software EasyMinerXR se obtuvo la data estructural: dip, dip direction, persistencia (Lenght) y espaciamento (Spacing). Como se ve en la Figura 26, el programa identificó tres familias en el sector analizado y se exporta la información en un archivo Excel para su procesamiento, que va a contener las Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Figura 26

Identificación de estructuras en el software EasyMiner XR



Nota: Elaboración propia. Los círculos azules corresponden a las estructuras de la familia 01, los círculos rojos a la familia 02 y los verdes, a la familia 03.

Tabla 2

Data estructural para la familia 01

DIP					
DIP (°)	DIRECTION	LENGTH(m)	SPACING(m)	SET	
	(°)				
51.90	34.00	2.52	0.16	1	
43.70	29.10	2.07	1.94	1	
50.50	29.90	2.28	0.13	1	
52.30	32.90	1.40	0.35	1	
53.30	31.60	1.48	0.52	1	
47.10	27.70	4.95	1.07	1	
40.20	59.20	1.31	0.12	1	
51.60	35.70	2.47	0.38	1	
44.10	54.20	1.40	1.94	1	
54.30	4.80	1.32	0.28	1	
45.40	35.70	2.70	0.37	1	

45.00	37.00	2.24	0.74	1
50.50	40.20	1.10	1.45	1
45.60	47.90	1.61	1.74	1
39.90	33.10	0.65	1.23	1
53.20	35.90	0.88	0.04	1
48.00	25.10	1.21	0.08	1
43.00	41.70	1.41	2.23	1
47.00	37.10	2.61	1.40	1
49.90	9.90	2.79	1.11	1
53.50	32.00	1.90	1.63	1
50.20	18.10	1.01	2.31	1
47.10	19.50	0.77	0.61	1
51.30	43.50	0.56	2.52	1
55.90	3.50	1.01	1.24	1
48.80	55.30	1.84	1.21	1
46.40	22.80	2.12	0.12	1
56.80	9.80	0.98	2.35	1
40.80	41.00	2.41	2.61	1
53.70	30.90	1.79	0.66	1
48.40	33.70	0.95	2.14	1
56.30	30.10	1.99	0.56	1
64.40	30.20	1.72	2.09	1
45.20	34.10	1.43	0.72	1
42.10	39.30	1.59	0.92	1
42.10	65.80	1.64	1.61	1
50.80	27.70	2.47	0.10	1
46.60	21.60	2.01	0.74	1
46.90	44.20	1.50	0.16	1
49.20	31.60	2.15	1.94	1
47.70	56.80	0.50	0.11	1
35.30	32.70	1.92	0.35	1

53.80	26.20	1.62	0.00	1
36.20	45.70	0.65	1.07	1
36.60	11.10	0.51	0.12	1
48.90	30.80	0.75	0.38	1
51.40	33.30	0.78	1.94	1
52.60	30.60	0.97	0.28	1
53.60	25.80	8.43	0.37	1
59.70	30.70	3.10	0.74	1
50.50	25.30	2.14	1.45	1
48.50	16.30	0.67	1.74	1
54.30	26.00	1.91	1.23	1
46.70	22.60	0.75	1.31	1
50.10	6.10	0.74	1.14	1
46.90	30.80	3.79	0.10	1
49.00	31.90	2.00	1.40	1
45.00	30.50	0.42	1.84	1
38.70	10.70	0.66	1.63	1
61.10	359.30	2.38	0.41	1
52.60	30.20	19.00	1.72	1
46.90	29.80	13.00	2.52	1
80.00	32.00	3.97	0.52	1

Nota. Elaboración propia. Se identificó 63 estructuras para la familia 01.

Tabla 3

Data estructural para la familia 02

DIP (°)	DIP DIRECTION (°)	LENGTH(m)	SPACING(m)	SET
86.20	163.60	4.39	1.64	2
86.90	164.00	1.13	0.12	2
60.70	170.80	1.18	0.06	2
85.80	160.80	1.27	2.33	2
79.00	180.10	1.84	0.46	2

89.60	161.60	0.80	0.75	2
75.80	158.60	0.77	1.87	2
87.50	346.90	4.30	0.54	2
86.60	174.10	2.03	0.57	2
63.30	158.20	0.69	0.49	2
89.90	335.10	4.54	1.11	2
81.70	338.10	0.32	0.18	2
88.00	332.80	0.21	1.11	2
86.70	349.20	0.93	1.03	2
89.20	161.00	0.60	2.04	2
87.50	178.90	0.75	0.29	2
89.90	340.90	1.87	1.37	2
86.70	338.60	1.76	1.67	2
79.50	342.60	0.47	0.76	2
86.70	340.70	1.75	1.89	2
89.80	153.80	6.00	1.14	2
89.80	354.20	0.74	1.14	2
81.60	177.50	0.66	2.78	2
88.70	359.20	1.07	0.10	2
88.00	340.10	10.00	1.52	2
89.30	340.90	1.59	0.86	2
87.10	343.10	2.22	0.00	2
89.60	350.60	1.57	0.09	2
82.10	184.70	3.61	0.97	2
90.00	156.20	4.13	1.65	2
85.10	164.00	4.94	1.74	2
89.50	343.90	3.50	0.89	2
87.20	339.20	4.61	1.87	2
74.30	167.10	4.20	2.05	2
79.70	180.20	5.29	2.76	2
83.30	150.50	0.59	0.58	2

87.00	338.00	0.40	0.05	2
85.60	346.60	0.81	0.16	2
66.00	350.00	2.23	0.01	2
79.10	351.20	2.18	2.15	2
80.60	345.90	0.17	0.02	2
88.80	336.10	3.26	2.23	2

Nota. Elaboración propia. Se identificó 42 estructuras para la familia 02.

Tabla 4

Data estructural para la familia 03

DIP				
DIP (°)	DIRECTION	LENGTH(m)	SPACING(m)	SET
	(°)			
84.10	247.20	1.70	0.96	3
84.10	49.00	5.38	0.32	3
79.60	64.40	1.83	0.19	3
84.00	51.90	1.70	0.04	3
88.20	49.40	1.52	0.41	3
80.50	79.90	2.26	0.52	3
81.40	71.90	3.60	0.63	3
62.10	234.50	0.43	1.83	3
82.40	244.30	0.56	0.34	3
88.90	61.50	0.57	1.03	3
87.20	55.00	0.18	0.38	3
80.30	236.30	0.48	1.84	3
62.60	249.80	1.00	0.44	3
85.50	245.10	1.01	0.25	3
88.80	232.80	1.56	0.85	3
79.00	246.10	0.29	1.57	3
89.50	65.00	0.98	0.35	3
89.80	238.70	0.89	0.86	3
89.00	235.60	1.13	0.42	3

77.40	235.40	0.48	0.10	3
85.50	248.30	1.45	0.79	3
77.60	237.80	1.70	0.62	3
63.10	246.40	2.17	0.67	3
80.00	236.10	1.26	1.16	3
86.80	76.10	2.14	1.15	3
76.70	265.20	0.85	1.64	3
83.30	240.00	0.65	2.32	3
89.50	240.50	2.54	2.73	3
70.70	81.60	1.48	3.55	3
83.50	253.50	1.31	1.42	3
77.90	241.60	2.59	2.11	3
73.10	242.60	0.95	0.05	3
81.10	60.20	0.22	0.11	3
87.90	240.00	0.50	0.04	3
73.20	77.90	0.72	0.23	3
75.70	289.90	0.55	0.22	3
87.80	250.00	0.57	0.13	3
73.00	276.90	1.47	1.99	3
71.80	268.00	1.88	2.08	3
86.20	265.60	2.93	2.87	3
67.80	266.50	3.10	3.41	3
75.70	54.20	1.83	1.64	3
67.60	258.90	2.73	2.49	3
84.60	80.90	0.65	1.20	3
67.40	77.00	1.04	0.15	3

Nota. Elaboración propia. Se identificó 43 estructuras para la familia 03.

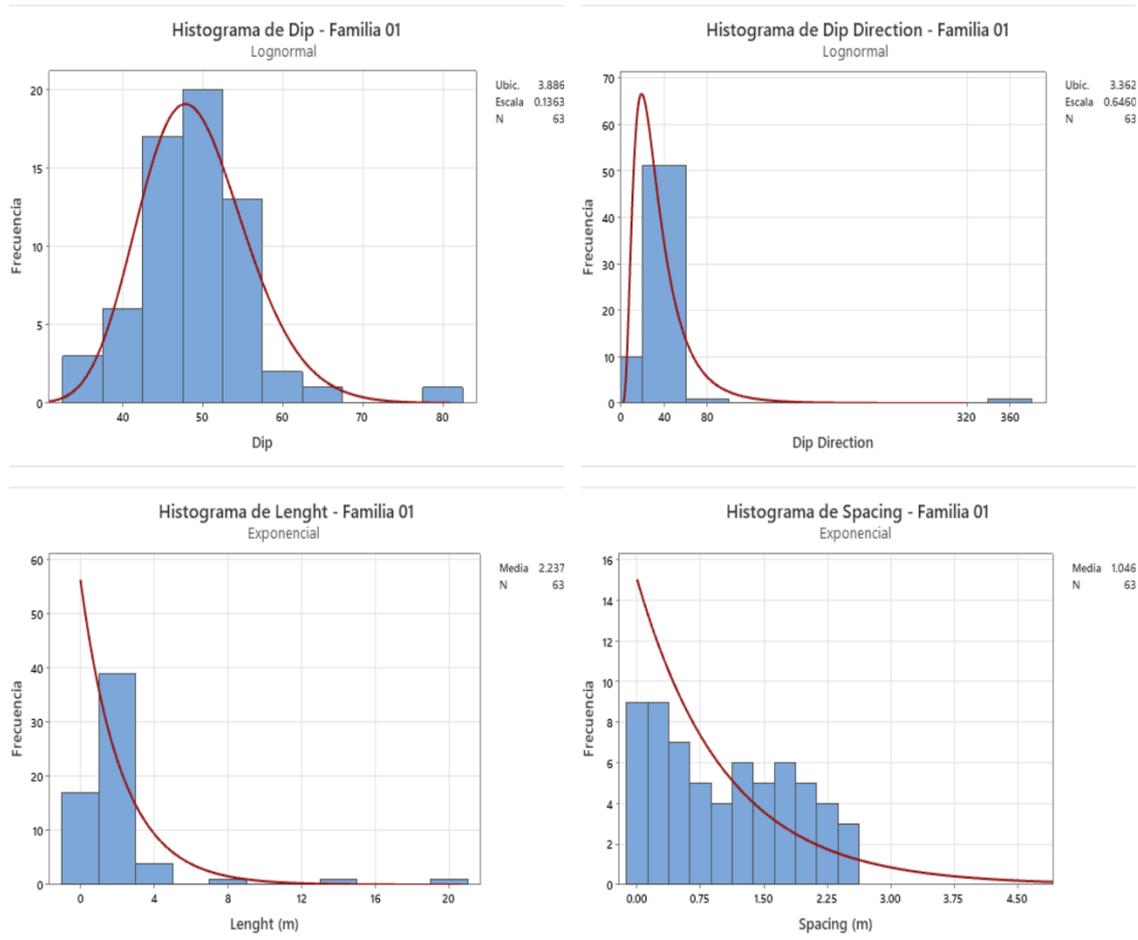
5.6 Validación de la información

El agrupamiento de estos datos tiene validación estadística. Para las propiedades de dip y dip direction de las fracturas tienen un comportamiento de distribución log-normal. Para

los datos de persistencia y espaciamiento la trayectoria de datos estadística será de tendencia exponencial negativa. Para este procedimiento se usó el software Minitab.

Figura 27

Validación Data Estructural Familia 01

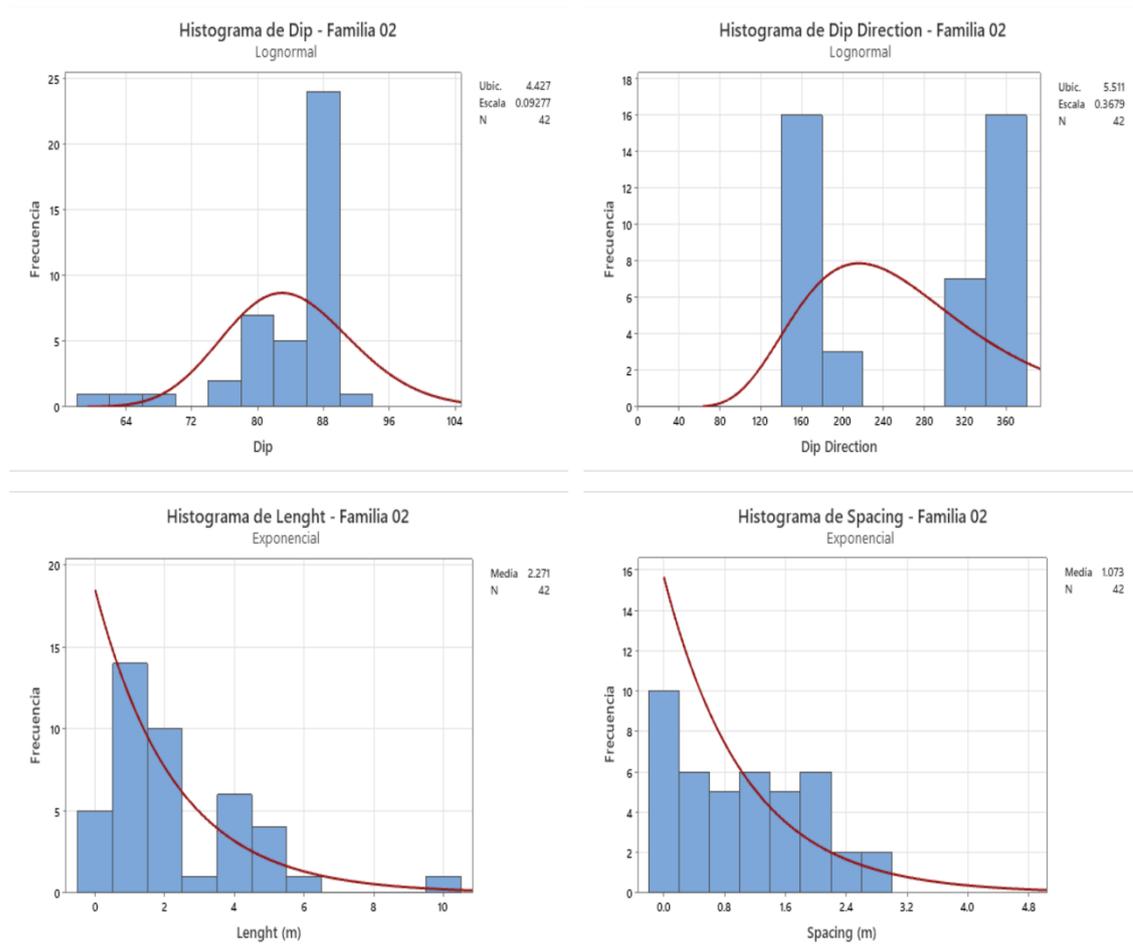


Nota. Elaboración propia. El comportamiento estadístico de los datos de la familia 01 siguen la tendencia.

En la Figura 27 , se ve los histogramas de cada propiedad de las discontinuidades de la familia 01; siguiendo la tendencia lognormal para dip y dip direction. Por otro lado, la persistencia y espaciamiento obedecen a un comportamiento exponencial negativo.

Figura 28

Validación Data Estructural Familia 02

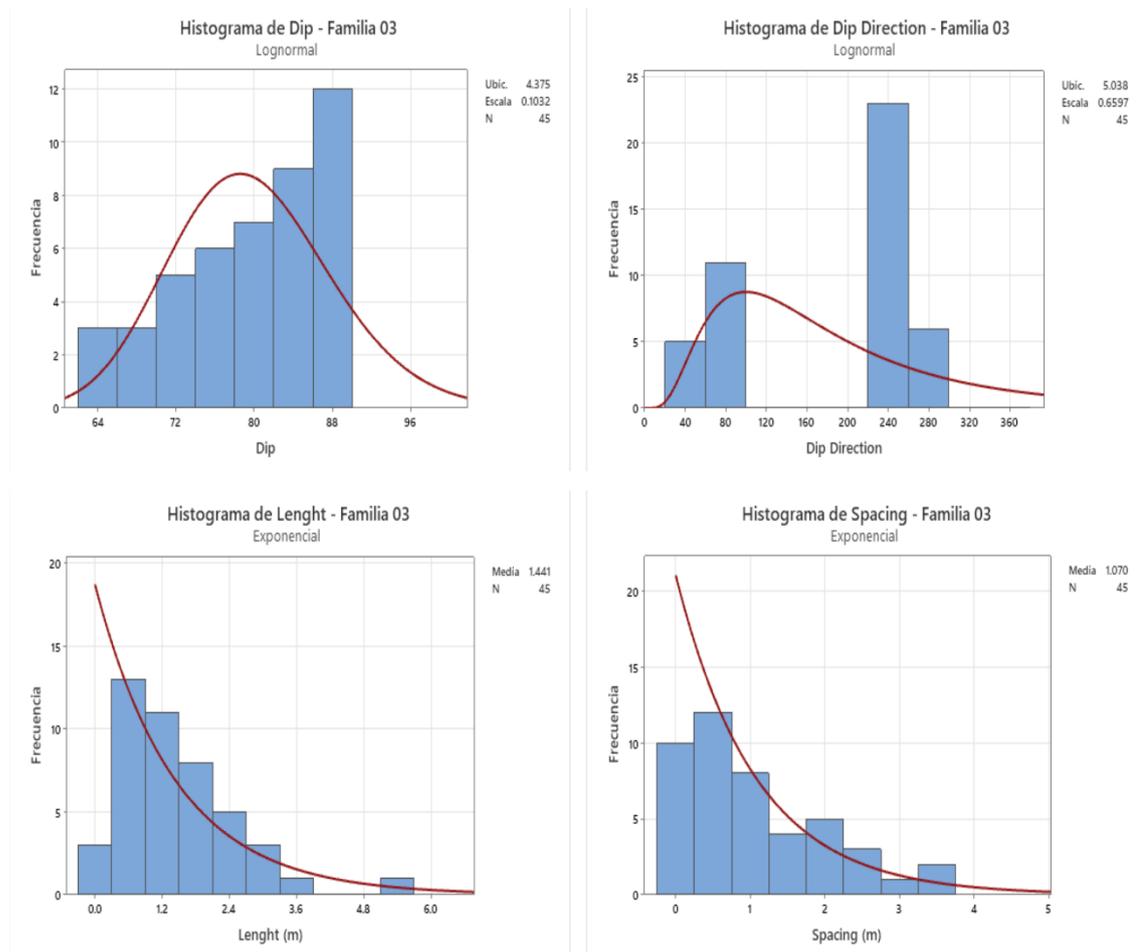


Nota. Elaboración propia. El comportamiento estadístico de los datos de la familia 02 siguen la tendencia.

En la Figura 28, Sí he empezado los histogramas correspondientes a las propiedades de las discontinuidades en la familia 02. En el caso de dip direction, no sigue un comportamiento lognormal ya que los planos están basculando, es decir; las discontinuidades tienen similar inclinación, pero ligeramente opuesta dirección de buzamiento; en el análisis estereográfico se podrá visualizar mejor la distribución de polos de la familia 02.

Figura 29

Validación Data Estructural Familia 03



Nota. Elaboración propia. El comportamiento estadístico de los datos de la familia 02 siguen la tendencia.

En la Figura 29, se ve otro caso de basculamiento en la dirección de buzamiento. Luego las propiedades se comportan de acuerdo a la tendencia respectiva. La selección y determinación de las propiedades se dará en el análisis estereográfico.

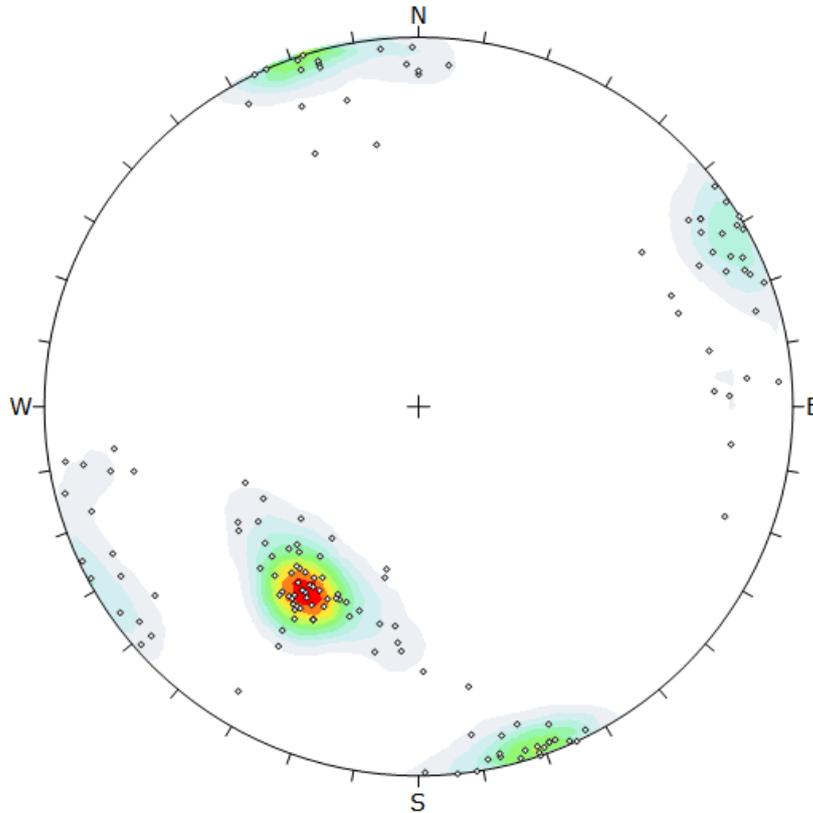
5.7 Análisis Cinemático

5.7.1 Análisis Estereográfico

Luego de validar la data estructural de cada familia se realiza el análisis cinemático. En primer lugar, se realiza el análisis estereográfico con los datos de dip y dip direction en el programa Dips, se visualiza la concentración de polos por cada familia como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Ploteo de concentración de polos

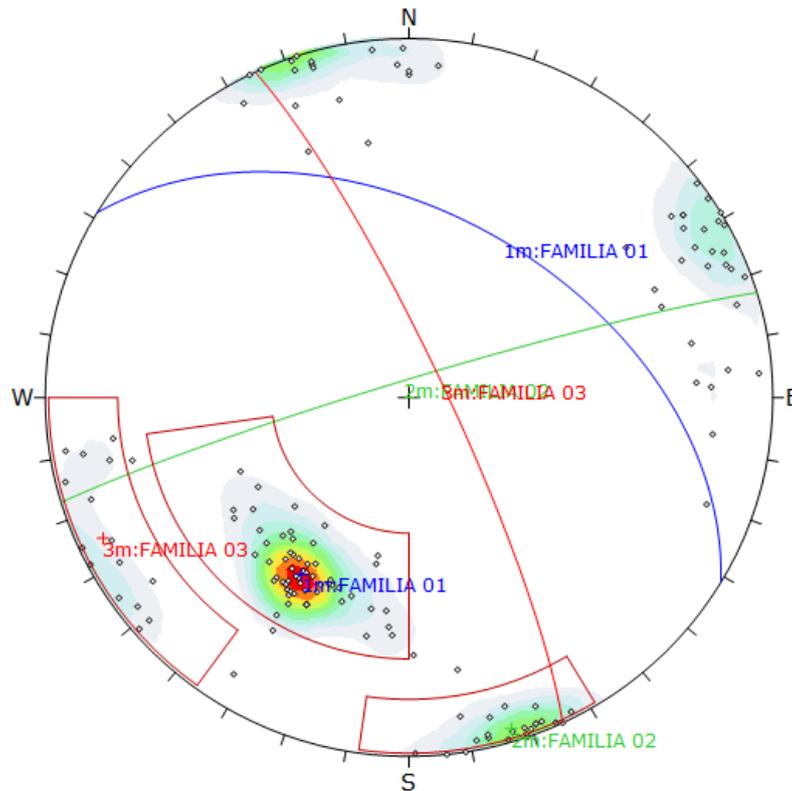


Nota. Elaboración propia. La distribución de los 150 polos en el estereograma.

Se define las familias de estructuras en el software Dips y se muestra la distribución de los planos estereográficos de cada uno, discretizando los polos alejados de respectivos agrupamientos y observando el fenómeno de basculamiento de la dirección de buzamiento entre 5 zonas principalmente pobladas de polos.

Figura 31

Set de Familias del talud



Nota. Elaboración propia. Se excluye polos de la familia 02 para representar adecuadamente.

En la Tabla 5 se detalló dip, dip direction y el rango de confiabilidad de estos datos en el software Dips de cada familia, según los planos generados.

Tabla 5

Dip y dip direction de las familias

FAMILIA	Dip (°)	Dip Direction (°)	Rango de Confiabilidad al 95%
Familia 01	48	31	9.5%
Familia 02	86	343	6.2%
Familia 03	82	65	11.7%

Nota. Elaboración Propia. Datos obtenidos en el software Dips.

5.7.2 Cálculo del análisis del análisis cinemático

Según Manasaya (2018), la roca arenisca tiene un ángulo de fricción de 35° (p.79). El talud tiene una inclinación de 83° y dirección de buzamiento de 25°.

Dado estos datos se realiza el análisis cinemático para determinar las probabilidades de ocurrencia de falla planar, en cuña y vuelco. Los resultados detallados de las iteraciones se podrán ver en el Anexo 02.

Tabla 6

Resultados de falla planar con ángulo de 83°

Deslizamiento Planar	Cantidad de polos en zona de falla	Porcentaje (%)	Cantidad Total de polos
Todos los polos	48	32.00	150
Familia 01	46	76.67	60

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

La familia 01 se aprecia una gran probabilidad de ocurrencia a falla planar de 76.67%, mientras que todas las discontinuidades tienen una probabilidad de ocurrencia en 32.00%

Tabla

7

Resultados de falla en cuña con ángulo de 83°

Tipo de Intersección	Porcentaje (%)	Cantidad de intersecciones en zona de falla	Cantidad Total de Intersecciones formadas
Todos los planos	63.12	7384	11168
Todos los planos agrupados	86.97	1957	2250
Planos Familia 01 vs Planos Familia 02	97.41	1052	1080
Planos Familia 01 vs Planos Familia 03	84.89	764	900
Planos Familia 02 vs Planos Familia 03	52.22	141	270

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

Las 11168 intersecciones de los 150 planos de nuestra data estructural han generado una probabilidad de ocurrencia de falla en cuña de 63.23%. Luego se detalló el porcentaje de falla en cuña por cada combinación de los sets seleccionados de familias.

Tabla 8

Resultados de falla por vuelco con ángulo de 83°

Deslizamiento por Vuelco	Cantidad de polos en zona de falla	Porcentaje (%)	Cantidad Total de polos
Todos los polos	0	0.00%	150

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

En la Tabla 8 se evidenció que ningún polo está en la zona de falla por vuelco; por lo tanto; la probabilidad de falla es cero.

5.8 Análisis Probabilístico

El análisis probabilístico de caídas bloque de rocas se ha ejecutado en el programa Sblock, el cual se basa en el método Keyblock escritos por Godman & Shi (1980) utiliza enfoques geométricos, proyecciones estereográficas y análisis vectorial para evaluación de estabilidad de bloques generados por túneles subterráneos o taludes. Los bloques surgen cuando la superficie del talud intercepta el conjunto de discontinuidades del macizo rocoso permitiendo la evaluación de parámetros como la renovabilidad y estabilidad.

Algunas consideraciones de esta teoría son las siguientes:

- ✓ Las superficies de las discontinuidades y superficie del talud, se dibujan sobre un mismo plano.
- ✓ Considera los mecanismos de probabilidad de ocurrencia de falla planar y cuña.
- ✓ Los bloques formados son rígidos, pueden presentar hasta 7 caras lo cual son potencialmente deslizable por cualquier plano del macizo rocoso.

El programa Sblock distribuye bloques gracias a la manera probabilística de introducir la persistencia y espaciamiento de las discontinuidades, esta toma de datos lo diferencia de diseños convencionales de banco-berma.

Los parámetros de datos de entrada son: dip, direction, espaciamiento y persistencia de las discontinuidades. Además, se debe ingresar los datos geométricos del talud y el ancho

de berma a utilizar. Por último, se ingresa la aceleración de la zona en estudio; el ángulo de fricción, la cohesión, el peso específico y ángulo de reposo del material.

Este software ofrece los resultados de probabilidad de falla, factor de seguridad de bloques planar/cuña, disminución de ancho de banco, pérdida de volumen de falla y derrame de rocas de un banco a otro.

En esta publicación es recomendable emplear los criterios de aceptabilidad, según Read & Stacey (2009) son aprobados a nivel internacional para construcción y minería.

Tabla 9

Criterios de Aceptabilidad de taludes rocosos

Escala	Consecuencia de la falla	Factor de Seguridad (mínimo)		Probabilidad de falla (max)
		Estático	Dinámico	P(FoS≤1)
Banco	Baja-Alta	1.10	N/A	25-50%
Inter-rampa	Baja	1.15-1.20	1.00	0.25
	Mediana	1.20	1.00	0.2
	Alta	1.20-1.30	1.10	0.1
Global	Baja	1.20-1.30	1.10	15-2%
	Mediana	1.30	1.10	5-10%
	Alta	1.3-1.50	1.10	≤ 5%

Nota: Adaptado de libro Guidelines for Open Pit Slope

5.8.1 Cálculo del análisis probabilístico

En la Tabla 10 se ingresa parámetros de entrada al programa, incluyendo valores promedios, máximos y mínimos de los polos seleccionados que forman las tres familias, previamente en el análisis cinemático.

Tabla 10

Datos de entrada al Sblock

Set	Dip	Dip	Dip	Mean	Min	Max	Mean	Min	Max	Cohe	Frict
		Direc	Range	Spacing			Length			sion	ion
1	48	31	9.50	1.00	0.60	2.50	2.50	0.50	19.00	0.0	35.0
2	86	343	6.20	1.00	0.50	2.80	2.30	0.40	10.00	0.0	35.0
3	82	65	11.70	1.20	0.50	3.00	1.50	0.20	6.00	0.0	35.0

Nota: Elaboración propia. Los términos; Max: máximo valor, Min: mínimo valor.

El valor de ángulo de fricción se mantiene en 35° . El valor de cohesión es 0 kPa ya que in situ se verificó que las aperturas de las discontinuidades están abiertas sin cohesión a causa de voladura. Según Manasaya (2018) el peso específico de la arenisca es 2352 kg/m³ (p.79).

Las condiciones del talud son: Un ángulo de 83 grados y dirección de buzamiento de 25 grados. Una altura de 20 metros. Se considera un ancho de berma efectivo de 1 metro ya que es la distancia de separación del talud al carril de la carretera. Emplear una distancia mayor no es adecuado ya que estaríamos justificando que los bloques se desplacen a más de un 1m, invadiendo el carril de la vía. Además, este ancho de berma afecta la probabilidad de falla aumentando de manera indirectamente proporcional, sesgando nuestros resultados. Finalmente, se utilizó una aceleración sísmica de 0.23g. Se realizó dos escenarios para analizar en esta configuración del talud: estático y pseudoestático.

Figura 32

Distribución de bloques en el talud 83 grados



Nota: Elaboración propia. Formación probabilística de bloques en el talud de 83 grados en Sblock.

En la Figura 32 se visualiza la probable distribución de bloques rocosos, los poliedros mostrados son los bloques caídos como se puede ver, podemos decir que tiene una alta probabilidad de falla.

Tabla 11

Resultados del análisis probabilístico con ángulo de talud 83°

Escenarios	Factor de seguridad de caídas de bloques	Probabilidad de falla (%)	Porcentaje de ancho de berma libre (%)
------------	--	---------------------------	--

Condición estática	0.77	55.00	4.00
--------------------	------	-------	------

Condición			
pseudoestática	0.46	63.00	5.00

Nota. Elaboración propia. Los valores estáticos son menores debido a la disminución de esfuerzos.

De acuerdo los resultados en la Tabla 11 , el valor de factor de seguridad para el caso estático fue de 0.77 que representan una presencia de más bloques inestables en talud. Empíricamente en tajos abiertos o construcción de taludes se recomienda que este valor sea mayor a 1.00. La probabilidad de falla fue de 55%; Sin embargo, en campo se recomienda que este va al lado sea menor al 15% por seguridad operativa. Finalmente, el porcentaje promedio de ancho de berma libre fue 4%; es decir, 4 Centímetros libres de fragmentos de roca antes de entrar en contacto con el carril de la carretera. Los valores de estos parámetros de salida se han notado desfavorecidos en condición pseudoestática cómo se ve en la Tabla 11.

5.9 Resultados del nuevo ángulo de diseño

Para que nuestro talud sea estable y mantenga la seguridad vial en la carretera Lima-Canta, una solución económica y de corto tiempo es disminuir el ángulo de diseño geotécnico ya que va disminuir la reducción de caídas de bloques rocosos.

Luego de probar iteraciones con 78° ,70 y 63°; el nuevo ángulo de diseño geotécnico elegido será 63 grados, que reduce la probabilidad de ocurrencia de falla y favorece los parámetros de medición del análisis probabilístico. A continuación, se detalla los resultados obtenidos.

5.9.1 Cálculo del análisis cinemático con el nuevo ángulo de talud

La única condición distinta de este nuevo cálculo, es la variación del ángulo del talud de 83 a 63 grados, los demás parámetros se mantienen.

Tabla 12

Resultados de falla planar con ángulo de 63°

Deslizamiento Planar	Cantidad de		Cantidad Total de polos
	polos en zona de falla	Porcentaje (%)	
Todos los polos	46	30.67	150
Familia 01	46	76.67	60

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

La familia 01 se mantiene una probabilidad de ocurrencia a falla planar de 76.67%, mientras que se reduce la probabilidad de ocurrencia a 30.67%.

Tabla 13

Resultados de falla en cuña con ángulo de 63°

Tipo de Intersección	Porcentaje (%)	Cantidad de intersecciones en zona de falla	Cantidad Total de Intersecciones formadas
Todos los planos	56.42	6302	11168
Todos los planos agrupados	79.91	1798	2250
Planos Familia 01 vs Planos Familia 02	97.13	1049	1080
Planos Familia 01 vs Planos Familia 03	83.22	749	900
Planos Familia 02 vs Planos Familia 03	0.00	0	270

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

Las 11168 intersecciones de los 150 planos de nuestra data estructural han generado una probabilidad de ocurrencia de falla en cuña se ha reducido a 56.42%. Luego se detalló el porcentaje de falla en cuña por cada combinación de los sets seleccionados de familias.

Tabla 14

Resultados de falla por vuelco con ángulo de 63°

Deslizamiento por Vuelco	Cantidad de polos en zona de falla	Porcentaje (%)	Cantidad Total de polos
Todos los polos	0	0.00%	150

Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos en el software Dips.

En la Tabla 14 se muestra que ningún polo se mantiene afuera en la zona de falla por vuelco; por lo tanto; la probabilidad de falla es cero.

5.9.2 Cálculo del análisis probabilístico con el nuevo ángulo de talud

El parámetro variante fue el ángulo de 63 grados en este análisis, los parámetros de entrada y el resto de datos se mantuvieron. Se calculó en condiciones estática y pseudoestática. Los resultados detallados de las iteraciones se podrán ver en el Anexo 03.

Figura 33

Distribución de bloques en el talud 63 grados



Nota. Elaboración propia. Formación probabilística de bloques en el talud de 63 grados en Sblock.

En la Figura 33 se visualiza la nueva posible distribución de bloques rocosos, los poliedros mostrados son los bloques caídos como se observa, podemos decir que presenta una disminución de probabilidad de falla.

Tabla 15

Resultados del análisis probabilístico con ángulo de talud 63°

Escenarios	Factor de seguridad de caídas de bloques	Probabilidad de falla (%)	Porcentaje de ancho de berma libre (%)
Condición estática	1.25	9.00	93.00
Condición pseudoestática	1.14	14.00	86.00

Nota. Elaboración propia. Los valores estáticos son menores debido a la disminución de esfuerzos.

De acuerdo los resultados en la Tabla 15, el valor de factor de seguridad para el caso estático asciende a 1.25 que representan una presencia de menos bloques inestables en el talud. La probabilidad de falla fue de 9.00 %, datos aceptables en los rangos mencionados.

Finalmente, el porcentaje promedio de ancho de berma libre fue 93%. En el caso pseudoestático los resultados son aceptables.

Tabla 16

Tabla comparativa de resultados sobre los análisis cinemático y análisis probabilísticos para los ángulos de diseño del talud

Parámetros de salida	Ángulo de	Ángulo de	Ángulo de	Ángulo de
	83°	78°	70°	63°
Probabilidad de ocurrencia falla planar (%)	32.00	31.33	31.33	30.67
Probabilidad de ocurrencia falla en cuña (%)	66.12	63.31	60.23	56.43
Probabilidad de ocurrencia falla de vuelco (%)	0.00	0.00	0.00	0.00
Factor de seguridad-Condición Estática	0.77	0.84	0.95	1.25
Probabilidad de Falla-Condición Estática (%)	55.00	45.00	27.00	9.00
Porcentaje de ancho de berma libre - Condición Estática (%)	4.00	57.00	83.00	93.00
Factor de seguridad-Condición Pseudoestática	0.46	0.61	0.86	1.14
Probabilidad de Falla-Condición Pseudoestática (%)	63.00	52.00	31.00	14.00
Porcentaje de ancho de berma libre - Condición Pseudoestática (%)	5.00	53.00	81.00	86.00

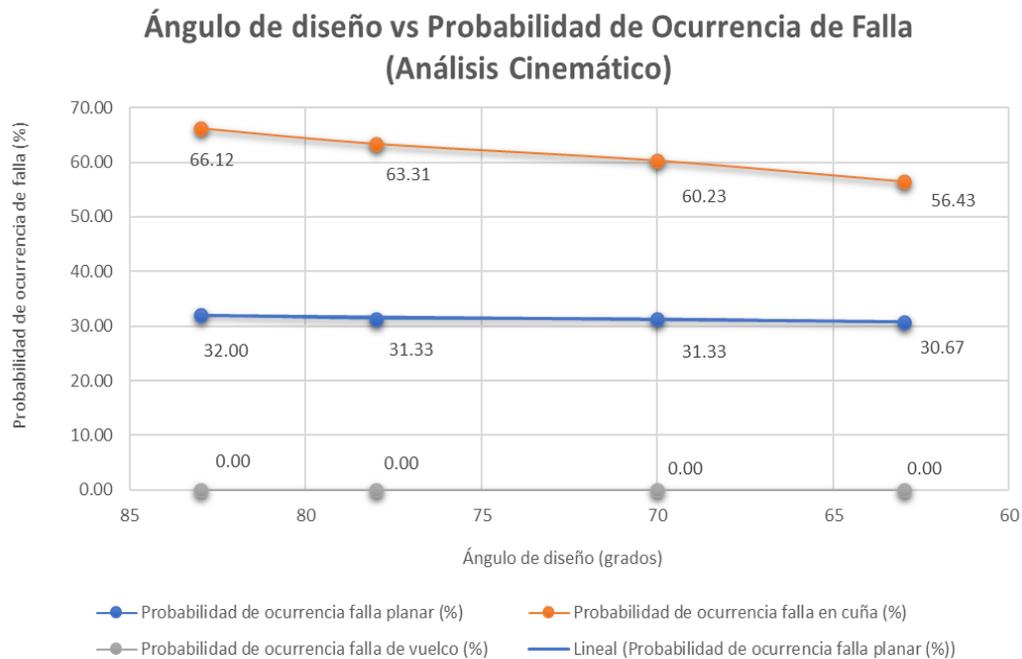
Nota. Elaboración propia. Tabla resumen de las cuatro iteraciones de ángulos del talud.

En la Tabla 16, se observa la variación de resultados para el estado actual, las iteraciones y la solución a nuestro objeto de estudio. La probabilidad de ocurrencia de falla planar disminuyó disimuladamente. En falla por cuña si notamos una variación de 10 % de probabilidad a favor. No se muestra falla por vuelco ya que el talud no presenta serie de estratos de buzamiento considerable ni dirección sub paralela.

De acuerdo al análisis probabilístico, con el ángulo de talud original los valores se presentaron inestables y de alto peligro a la vía. Con el nuevo diseño, los parámetros de salidas mejoran considerablemente para ambos escenarios, hasta llegar a rangos aceptables que signifiquen la estabilidad del talud.

Figura 34

Ángulo de diseño vs Probabilidad de Ocurrencia de Falla- Análisis Cinemático

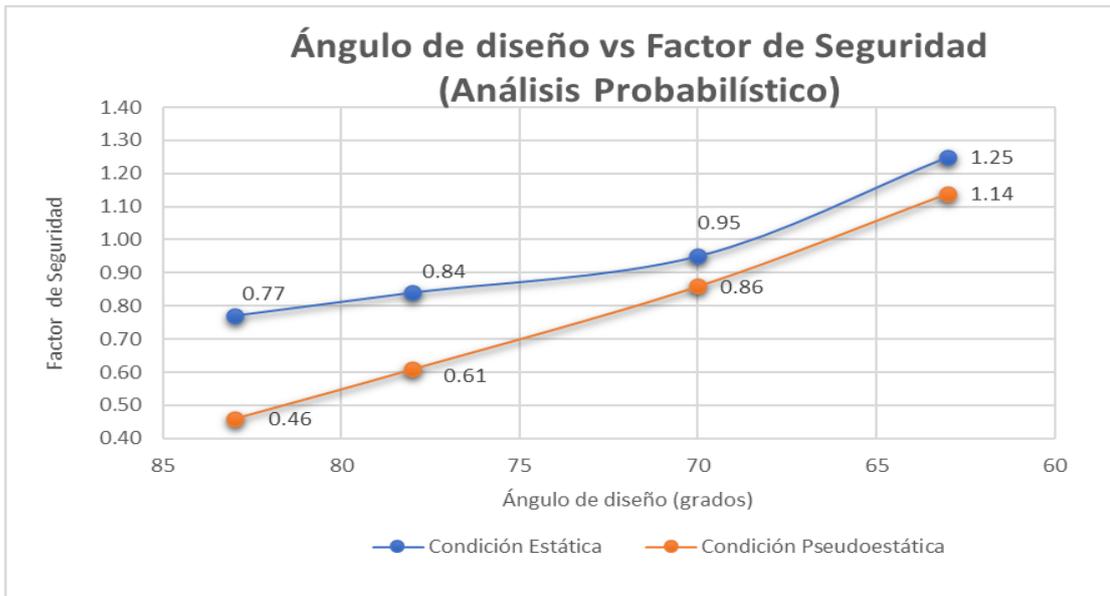


Nota. Elaboración propia. Tendencia de menor ángulo del talud disminuye el tipo de ocurrencia de falla.

En la Figura 34, se observa que, a menor ángulo de diseño del talud, la probabilidad de falla planar y en cuña va disminuyendo gradualmente. En este caso la falla por vuelco es 0.00 ya que no hay columnas estratigráficas ni orientación opuesta al talud.

Figura 35

Ángulo de diseño vs Factor de Seguridad



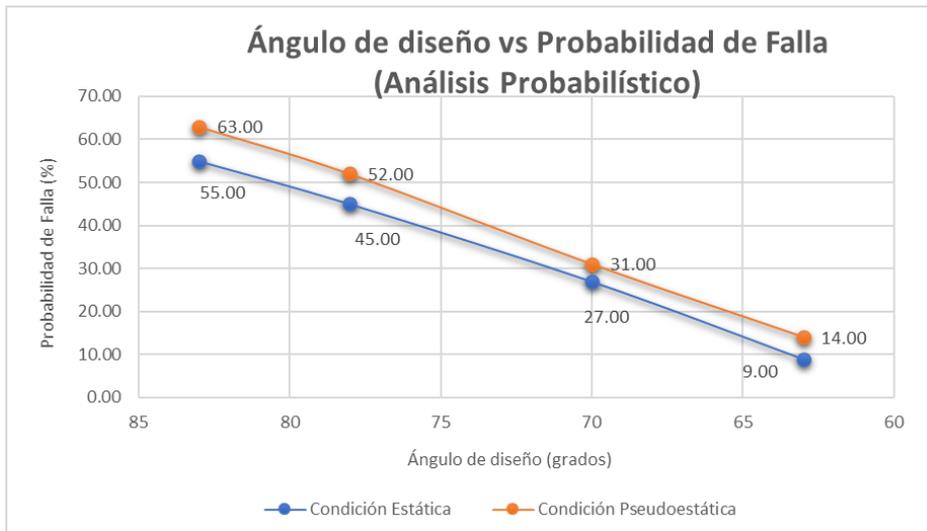
Nota. Elaboración propia. Tendencia de menor ángulo del talud aumenta el factor de seguridad.

En la

Figura 35, se observa que para ambas condiciones el Factor de seguridad de los bloques se incrementan acorde disminuye el ángulo del talud. En el ángulo de 63 grados se ve que ambos valores son estables ya que son mayores a 1.00.

Figura 36

Ángulo de diseño vs Probabilidad de Falla

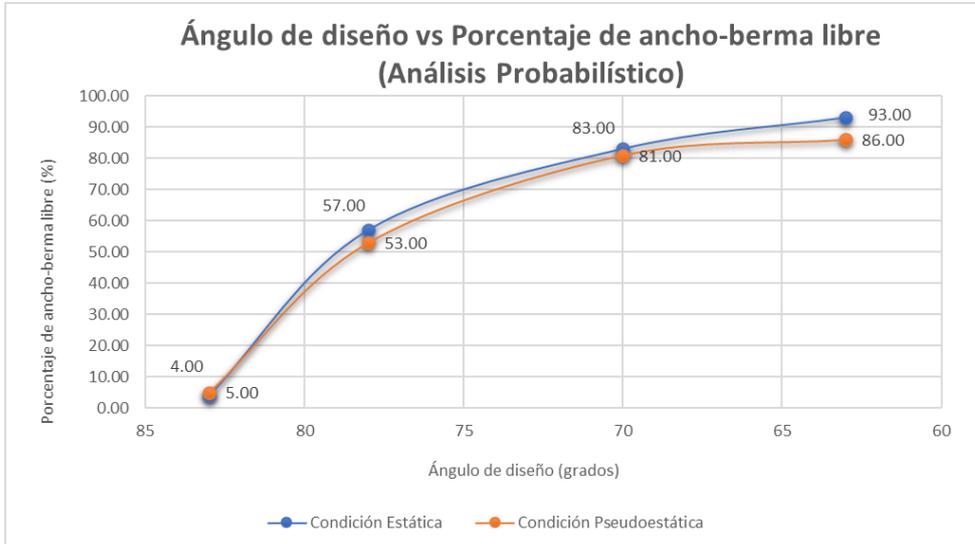


Nota. Elaboración propia. Tendencia de menor ángulo del talud disminuye la probabilidad de falla.

En la Figura 36, se observa que para ambas condiciones la probabilidad de falla de bloques disminuye acorde disminuye el ángulo del talud. En el ángulo de 63 grados se ve que ambos valores son estables ya que son menores a 15%.

Figura 37

Ángulo de diseño vs Porcentaje de ancho-berma libre



Nota. Elaboración propia. Tendencia de menor ángulo del talud aumenta el ancho libre de berma.

En la Figura 37, se nota la tendencia de que el porcentaje de ancho-berma libre del talud aumenta conforme disminuye con el ángulo de diseño, ya que la probabilidad de falla es indirectamente proporcional ya que habría menos volumen acumulado en la berma.

CAPÍTULO VI: DISCUSIÓN

Como objetivo específico se consideró generar el modelo fotogramétrico 3D para la obtención de la data estructural del macizo rocoso. Según Delgado-Reivan (2023) afirma que un modelo fotogramétrico es construido gracias al vuelo programado de dron que toma una serie de imágenes de alta resolución traslapadas desde distintos ángulos de vista, luego con programas computacionales se puede realizar reconocimiento y extracción de la data estructural de discontinuidades. En los resultados se generó el modelo fotogramétrico 3D con Pix4Dmapper, se procesa en el programa EasyMiner XR para obtener la data estructural de 150 planos de discontinuidades a lo largo del talud; identificando tres familias principales y finalmente la distribución de los datos de cada familia se comporta conforme a la tendencia estadística de cada propiedad de las discontinuidades. De manera similar, Villareal (2019) genera con dron los modelos fotogramétricos 3D de la presa Achoquen y un afloramiento llamado “La Escuelita” para extraer 840 y 620 planos de data estructural de las juntas, sino que comparó datos obtenidos con brújula y datos tomados del modelo 3D. En el primer caso se obtiene una desviación angular de 2.06 grados; en el otro proyecto la desviación angular fue de 1.21 grados; validando que los datos obtenidos por un modelo 3D son muy similares a los datos de forma manual. Este antecedente y nuestra investigación, evidencian que la data estructural de un modelo fotogramétrico 3D es confiable ya sea por validación estadística o comparación manual con brújulas y winchas. Además, esta metodología de mapeo estructural es más rápida, más segura ya que no expone el personal a medir juntas de difícil acceso y económico ya que un dron no es un equipo de excesivo costo.

En el segundo objetivo específico fue calcular la probabilidad de ocurrencia de falla mediante el análisis cinemático en el software Dips. Según González de Vallejo (2002) afirma que la probabilidad de ocurrencia de falla planar se debe a que el buzamiento de la discontinuidad es menor al ángulo del talud y/o, Aunque el buzamiento de la junta sea mayor al ángulo de fricción. La falla en cuña sucede porque mínimo los planos de dos familias se cortan formando una línea de intersección, esta recta debe usar en el sentido del buzamiento del talud. La falla en vuelco se presenta estratos que están buzando en sentido opuesto al ángulo de talud, se evidencia un sistema de discontinuidades ortogonales. De los resultados se obtuvo 32.00% de falla planar en todos los planos, siendo la familia 01 la principal causante de esta. Para falla en cuña se obtuvo un 63.12%, ocasionado por varios planos que se interceptan. La falla por vuelco es 0% ya que no se

presenta discontinuidades buzando contrarias a la inclinación del talud de 83° ; estos porcentajes de fallas se puede inferir que existe riesgo de caídas de bloques, luego con análisis probabilidad se mide la inestabilidad. Los resultados coinciden con lo obtenido de Chávez (2020) que realiza análisis cinemático para taludes de la Carretera Yurimaguas que determinaron que la ocurrencia de falla planar en su talud es 43% y la probabilidad de falla en cuña sea 58 %, por último 0% probabilidad de falla en vuelco, luego de esto se prosiguió a calcular el factor de seguridad para los dos tipos de falla e identificar la inestabilidad del talud. Esta investigación y la nuestra dan a conocer que es importante determinar cuáles y los más importantes tipos de ocurrencia de falla presentes en las discontinuidades del macizo rocoso para determinar con análisis complementarios la inestabilidad del talud.

El tercer objetivo específico fue calcular la probabilidad de falla y factor de seguridad mediante el análisis probabilístico en el software Sblock. Según Hormazábal (2019) Los valores calculados serán óptimos cuando los datos de entrada, son verificables en campo ya que informaciones dispersas pueden ocasionar resultados equívocos que generen una decisión de diseño errónea. Además, hay una relación en la teoría Keyblock, la cual es a menor factor de los bloques mayor probabilidad de falla. Los resultados de esta investigación indican que para el ángulo de diseño de 83° se obtiene un factor de seguridad de 0.77 en condición estática y 0.46 en condición pseudoestática. Asimismo, la probabilidad de falla es 55% y 63% en respectivos escenarios. Estos resultados se pueden significar inestables en alto riesgo según Read & Stacey (2009) ya que ellos establecen criterios de aceptabilidad a nivel internacional, bajo un historial en campo de distintas minas en su libro Guidelines for Open Pit Slope. Los cálculos de estabilidad de bloques serán importantes para determinar soluciones distintas geotécnicas efectivas, rápidas y económicas.

El ultimo objetivo específico se consideró simular los nuevos ángulos de diseño geotécnico en base a los resultados de los análisis cinemático y probabilístico. Según Rodríguez (2014) menciona Que los parámetros de análisis probabilístico de taludes mejorarán si se disminuye el ángulo de diseño debido a que existe menos volumen de bloques rocosos; por lo tanto, menos fuerza actuante, debilitando los planos de falla.

En los resultados se va disminuyendo los ángulos de diseño de manera progresiva, desde $83,78,70$ y 63 grados. En este último valor se encuentra el factor de seguridad y Probabilidad de Falla estables 1.25 y 9% en condición estática y 1.14 y 14% pseudoestática respectivamente. Estos resultados concuerdan con Kulatilake et al. (2011)

para el análisis de taludes en la presa del río Yihuan, realizando análisis cinemático y el análisis probabilístico Keyblock. Se toma muestras de taludes entre rangos de 50 a 90 grados, Luego de los calcular iteraciones, los ángulos de diseño oscilan entre 30 y 40 grados acorde al buzamiento y parámetros geotécnicos con factores de seguridad mayores a 1.1 y probabilidad de falla menores a 25, Los ángulos de pendiente máximo seguros para el análisis cinemático resulta menor igual que los calculados con análisis probabilístico a una variación de 3 % ;por lo tanto realizar la evaluación con ambas metodologías son válidas , aunque los cálculos probabilístico tienen mejor confiabilidad ya que evalúa persistencia y espaciamientos de las discontinuidades. Los resultados de esta investigación y la nuestra se asemejan que se debe bajar los ángulos de diseño de taludes, esta medida es un método de estabilización muy económico y rápido para no ocasionar accidentes que afecten a las personas.

CONCLUSIONES

- 1.- Mediante el análisis cinemático y probabilístico de la estabilidad del talud rocoso ubicado en Canta km 23+700 a km 23+770, se obtuvo la familia 01 se aprecia una gran probabilidad de ocurrencia a falla planar de 76.67% y el factor de seguridad debajo del estándar establecido por la norma, afirmando una alta probabilidad de falla.
- 2.- En la presente investigación se realizó el análisis cinemático y probabilístico de la estabilidad del talud rocoso ubicado en Canta km 23+700 a km 23+770 mediante el programa Dips y Sblock.
- 3.- Con la ayuda del programa Dips, para realizar análisis y visualizar información estructural, colocando datos de orientación que se realizó mediante el *software EasyMiner XR*, con el programa Dips se visualizó tres tipos de familias en el talud rocoso a estudiar, en el cual se observó la alta probabilidad de ocurrencia de falla en la familia 01.
- 4.- Con la ayuda del programa Sblock, se analizó diferentes iteraciones con 78°, 70 y 63°; el nuevo ángulo de diseño geotécnico elegido será 63 grados (tabla 15), que reduce la probabilidad de ocurrencia de falla y favorece los parámetros de medición del análisis probabilístico.
- 5.-Es fundamental concluir que para poder realizar adecuadamente los softwares mencionados, en el cual se utilizó en la presente investigación para el análisis de estabilidad de taludes de rocas en la carretera Canta km 23+700 a km 23+770, es necesario saber el proceso para realizar cada análisis, así mismo identificación de la zona más crítica para obtener resultados acorde a la investigación a realizar, para la obtención de los datos depende de los resultados favorables y llegar a los objetivos.

RECOMENDACIONES

- 1.- Para comenzar con la toma de datos, se recomienda ver el área de peligro de la zona para no tener ningún inconveniente al momento de realizar el vuelo, también no menos importante ir con ropa adecuada de campo ya que es un área altamente peligrosa por los desprendimientos de rocas.
- 2.- Para la recopilación e información de datos en el campo se debe realizar la ubicación del estudio de talud a analizar, verificando un área despejada, amplia, para poder realizar los vuelos programados con el dron mediante un aplicativo, para que este analice el área de concentración del estudio.
- 3.- Utilizar los programas para poder obtener los datos correspondientes al área del estudio, ya que estos programas tienen una secuencia en la cual no deberíamos tener error al comenzar el uso del software.
- 4.- Mientras se identifica los planos de las discontinuidades en Easy Miner Xr se debe tener cuidado y caracterizar adecuadamente las estructuras grandes y no dividirlos, ya que afectará a nuestros análisis posteriores con la persistencia, también la distribución de los planos a lo largo del talud debe ser uniforme ya que nos ofrecerá espaciamientos dispersos.
- 5.- Por último, no menos importante, la capacitación constante y actualización en el uso de las herramientas tecnológicas usadas, además complementar con los conocimientos de las normas para poder realizar los correctos datos que se van obteniendo en cada programa.

REFERENCIAS

- Andrés, P., Laura, C., Carlos, R. (2020). Modelo de bloque deslizante para analizar el comportamiento cinemático de deslizamientos en suelos a partir de las fuerzas resultantes de un modelo de equilibrio límite. (Artículo). Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-28132020000100064
- Carhuantanta R., Carpio J. (2020). Análisis estructural del macizo rocoso para determinar el factor de seguridad en taludes de la carretera Cochabamba – Cutervo –Puerto Chiple. Tesis de pregrado. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/59304>
- César, P., (2021). Análisis de estabilidad de taludes de una extensión de 260 metros en la vía Papallacta Baeza, sector Cuyuja. Escuela Politécnica Nacional. (Tesis de pregrado). Obtenido por <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21881>
- Delgado-Reivan, X., Paredes-Miranda, C., Loaiza, S., Echeverria, M. D. P. V., Mulas, M., & Jordá-Bordehore, L. (2023). Stability analysis of rocky slopes on the Cuenca–Girón–pasaje road, combining limit equilibrium methods, kinematics, empirical methods, and photogrammetry. *Remote Sensing*, 15(3), 862. <https://doi.org/10.3390/rs15030862>
- Diego, A. (2020). Análisis de estabilidad estática de un talud crítico en el distrito de Magdalena por el método de elementos discretos (DEM). Pontificia Universidad Católica del Perú. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/17708>
- George, H., & Carlos, T., (2020). Análisis de confiabilidad de la propuesta de ingeniería de solución definitiva para la estabilización del talud de la vía evitamiento sector Zarumilla. Universidad Ricardo Palma. (Tesis de pregrado). Obtenido de <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3562>
- Ghosh, S., Kumar, S., Khare, S. K., & Pandey, H. K. (2022). Stability assessment of siwalik rock slopes — A case study from Dehradun area, Uttarakhand, India. *Journal of the Geological Society of India*, 98(12), 1737–1744. <https://doi.org/10.1007/s12594-022-2245-1>
- Greif, V., & Vlčko, J. (2013). Key block theory application for rock slope stability analysis in the foundations of medieval castles in Slovakia. *Journal of Cultural Heritage*, 14(4), 359–364. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.09.001>

- Haswanto, H., Ghani, R.A. (2008). Application of the block theory for rock slope stability analysis at highway semenyih-sg.Long (SSL), selangor state in Malaysia. <https://doi.org/10.17576/jsm-2023-5202-07>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6ta ed.). McGraw-Hill.
- Herrero, M. J., Pérez-Fortes, A. P., Escavy, J. I., Insua-Arévalo, J. M., De la Horra, R., López-Acevedo, F., & Trigos, L. (2022). 3D model generated from UAV photogrammetry and semi-automated rock mass characterization. *Computers & Geosciences*, 163(105121), 105121. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2022.105121>
- Hormazabal, E. Prudencio, M y Cofre, M. (2019). Diseño y Desempeño de Taludes en Roca a Escala Banco-Berma. <https://www.srk.com/es/publicaciones/disenoy-desempeno-de-taludes-en-roca-a-escala-banco-berma>
- Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (2021). Geología del cuadrángulo de Chosica (hojas 24j1, 24j2, 24j3, 24j4), Lima.
- Instituto Geofísico del Perú. (2020). Levantamiento topográfico mediante fotogrametría aérea con dron y mediciones GPS de Alto Laran y Rio Chico, Ica.
- Kulatilake, P. H. S. W., Wang, L., Tang, H., & Liang, Y. (2011b). Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses. *Computers and Geotechnics*, 38(6), 846–860. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2011.05.004>
- Manasaya J. (2018). Evaluación del talud del km 344+250 de la red vial interoceánica sur para su estabilización a través de la aplicación de concreto proyectado (Tesis de Titulación). Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez. Obtenido de <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2164>
- Mammoliti, E., Pepi, A., Fronzi, D., Morelli, S., Volatili, T., Tazioli, A., & Francioni, M. (2023). 3D Discrete Fracture Network modelling from UAV imagery coupled with tracer tests to assess fracture conductivity in an unstable rock slope: Implications for rockfall phenomena. *Remote Sensing*, 15(5), 1222. <https://doi.org/10.3390/rs15051222>
- Medinaceli Tórrez, R., & Medinaceli Ortiz, R. (2021). Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 6(1), 33–47. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522021000100004

- Novoa, E. (2019). Evaluación geotécnica para determinar La Inestabilidad de los taludes en roca en la carretera del tramo Chilete – Puente Muyuna (Tesis de Titulación). Universidad Nacional de Cajamarca. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/2920>
- Niño, J. (2017). Análisis probabilístico para el diseño de taludes en Explotación minera Tajo abierto. Tesis para maestría. Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/60957>
- Pagano, M., Palma, B., Ruocco, A., & Parise, M. (2020). Discontinuity characterization of rock masses through terrestrial laser scanner and unmanned aerial vehicle techniques aimed at slope stability assessment. *Applied Sciences (Basel, Switzerland)*, 10(8), 2960. <https://doi.org/10.3390/app10082960>
- Read J., & Stacey, P. (2009). *Guidelines for open pit slope design*. CRC Press.
- Adrián, R. (2015). Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica (Doctor). Universidad de Alicante. Obtenido de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/51107>
- Rodríguez, R. J. (2014). Ingeniería de rocas: caracterización de macizos rocosos y teoría de bloques para estabilidad de taludes: un enfoque probabilístico. Ed: Universidad de Oviedo.
- Rubén, M., & Rubén, M., (2021). Aplicación de la simulación de Montecarlo a la evaluación probabilística de la estabilidad de taludes en roca (Artículo). Obtenido de http://www.scielo.org/bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522021000100004
- Tomas, R., Riquelme, A., Pastor, J.L., Pagan, J.L., Asensio, J.L., Ruffo, M. (2020). Evaluación de la estabilidad de taludes rocosos a partir de nubes de puntos 3D obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado. (Artículo). Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7472875>
- Villareal, E. (2019). Caracterización automática de La geometría de discontinuidades En macizos rocosos mediante algoritmo difuso Aplicado a datos Lidar y “Structure From Motion”. La tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Obtenido de <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/5c39341d-0654-4f2f-8e33-c775cd0eedf8>

- Villanueva, J. (2019). Metodología para la extracción de familias de discontinuidades a partir de nubes de puntos obtenidas con drone. La tesis para obtener el título de Ingeniero Geólogo. Universidad Autónoma de México. Obtenido de <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/handle/132.248.52.100/16521>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. Taylor & Francis Group.

ANEXOS

Anexo A: Matriz de Consistencia

TEMA: ANÁLISIS CINEMÁTICO Y PROBABILÍSTICO PARA EVALUAR EL DESPRENDIMIENTO DE CAÍDA DE ROCAS EN TALUDES

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADOR	METODOLOGÍA
¿Cuál es el nuevo ángulo de diseño geotécnico que se obtiene mediante el análisis Cinemático y Probabilístico para disminuir el riesgo de desprendimiento de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima-Canta tramo km.23+700 a km.23+770?	Evaluar los ángulos de diseño geotécnico mediante el análisis Cinemático y Probabilístico para reducir el riesgo de desprendimiento de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima-Canta tramo km.23+700 a km.23+770.	Al reducir los ángulos de diseño geotécnico mediante el análisis Cinemático y Probabilístico se disminuye el riesgo de caídas de rocas en taludes de la carretera Lima Canta tramo km.23+700 a km.23+770.	Ángulo de diseño geotécnico	— Estabilidad de Taludes Rocosos — Condiciones geotécnicas y Geológicas —Experiencia técnica	— Estructuras — Macizo Rocoso — Supervisión de Obra	<p>Método: Deductivo</p> <p>Tipo: Explicativa</p> <p>Nivel: Descriptivo</p> <p>Diseño: No Experimental, Transversal</p> <p>Población: Taludes rocosos del Perú</p>
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS	VARIABLE DEPENDIENTE			
¿Cómo la generación del modelo fotogramétrico 3D permite obtener data estructural de las discontinuidades?	Generar el modelo fotogramétrico 3D para la obtención data estructural de las discontinuidades.	Al generar el modelo fotogramétrico 3D se obtiene data estructural de las discontinuidades.		— Data estructural — Probabilidad de ocurrencia de falla	— Propiedades Índices de Discontinuidades — Probabilidad de ocurrencia de falla	<p>Muestra: Los taludes rocosos de la carretera Lima-Canta del km23+700 a km 23+770</p> <p>Técnicas: Observación Directa, Información de Campo, Análisis documental.</p>
¿Cuáles son las probabilidades de ocurrencia de falla del talud mediante el análisis cinemático que determina la inestabilidad de bloques rocosos?	Calcular las probabilidades de ocurrencia de falla del talud mediante el análisis cinemático para determinar la inestabilidad de bloques rocosos.	Se verifica que las probabilidades de ocurrencia de falla mediante el análisis cinemático presentan valores inestables para el talud de bloques rocosos.	Desprendimiento de caída de rocas	—Probabilidad de falla —Factor de seguridad	—Probabilidad de falla —Factor de seguridad	

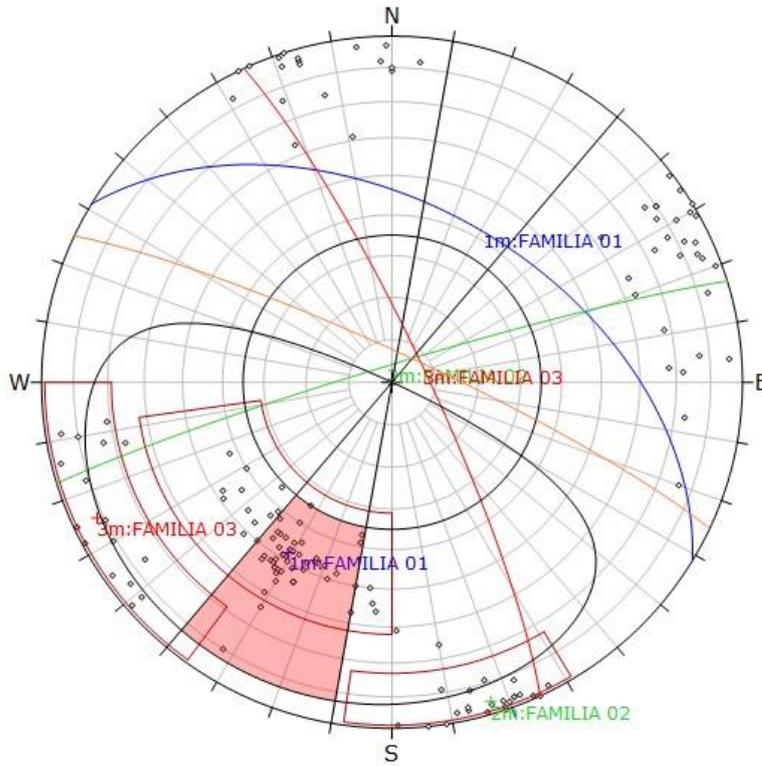
<p>¿Cuál es la probabilidad de falla y factor de seguridad del talud mediante el análisis probabilístico que determina la inestabilidad de bloques rocosos?</p>	<p>Calcular la probabilidad de falla y factor de seguridad del talud mediante el análisis probabilístico para determinar la inestabilidad de bloques rocosos.</p>	<p>Se demuestra que la probabilidad de falla y factor de seguridad mediante el análisis probabilístico presentan valores inestables para el talud de bloques rocosos.</p>
<p>¿Cómo los ángulos de diseño del talud influyen en los resultados de los análisis cinemático y probabilístico?</p>	<p>Simular los nuevos ángulos de diseño geotécnico para disminuir los resultados de los análisis cinemático y probabilístico.</p>	<p>Al reducir los ángulos de diseño geotécnico se disminuye los resultados de los análisis cinemático y probabilístico.</p>

Instrumentos:
 Pix4Dmapper,
 EasyMiner XR, Dips
 y Sblock.

Anexo B: Resultados Análisis Cinemático

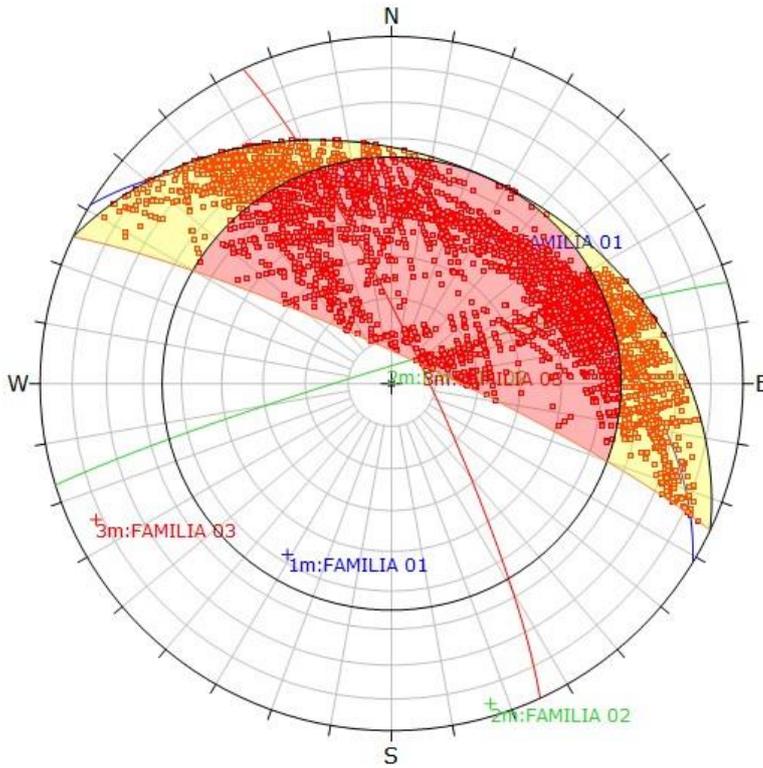
Registro Análisis Cinemático 83 grados

Falla Planar:



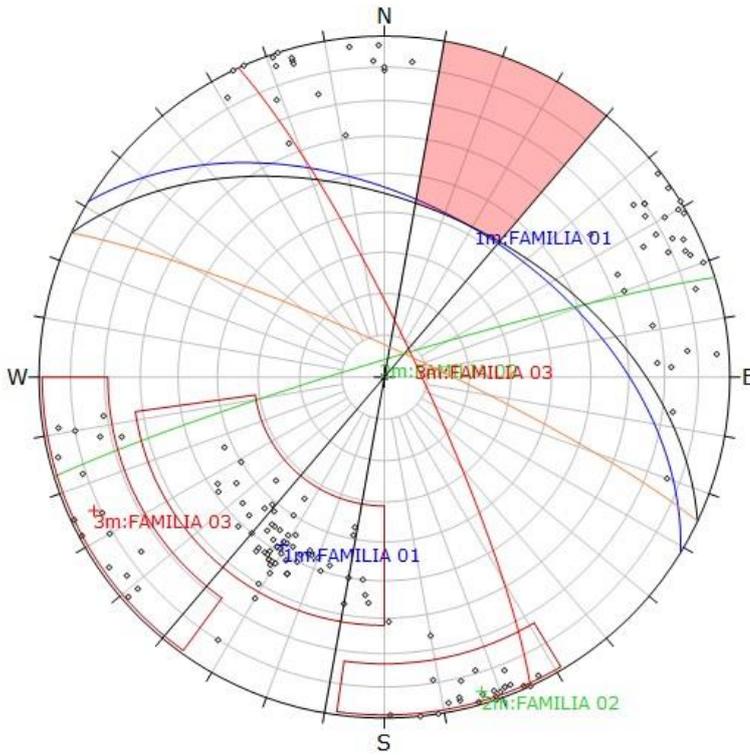
Symbol	Feature		
o	Pole Vectors		
Kinematic Analysis Planar Sliding			
Slope Dip	83		
Slope Dip Direction	25		
Friction Angle	35°		
Lateral Limits	15°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	48	150	32.00%
Planar Sliding (Set 1: FAMILIA 01)	16	60	76.67%
Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	18	31	FAMILIA 01
2m	86	343	FAMILIA 02
3m	82	65	FAMILIA 03
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		150 (150 Entries)	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Area	

Falla en Cuña:



Symbol	Feature			
■	Critical Intersection			
Kinematic Analysis Wedge Sliding				
Slope Dip 83				
Slope Dip Direction 25				
Friction Angle 35°				
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		7062	11168	63.23%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	18	31	FAMILIA 01	
2m	86	343	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Intersection Mode		Grid Data Planes		
Intersections Count		11168		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Falla en vuelco:



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Kinematic Analysis		Flexural Toppling		
Slope Dip	83	Critical	Total	%
Slope Dip Direction	25			
Friction Angle	35°			
Lateral Limits	15°			
Flexural Toppling (All)		0	150	0.00%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	Blue	48	31	FAMILIA 01
2m	Green	86	343	FAMILIA 02
3m	Red	82	65	FAMILIA 03

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	

INFORME DE ANALISIS CINEMATICO PARA TALUD 78 GRADOS:

Kinematic Analysis

Slope Dip: 83

Slope Dip Direction: 25

Friction Angle: 30°

Lateral Limit Angle: 15°

Planar Sliding

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	48	32.00%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

Planar Sliding (No Limits)

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	73	48.67%	150
Set 1: FAMILIA 01	60	100.00%	60
Set 2: FAMILIA 02	3	16.67%	18
Set 3: FAMILIA 03	5	33.33%	15

Wedge Sliding

Critical 1 = Wedge Sliding (Both Planes)

Critical 2 = Wedge Sliding (One Plane)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	2385	21.36%	4999	44.76%	11168
All Set Planes	703	31.24%	1254	55.73%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	191	17.69%	861	79.72%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	395	43.89%	369	41.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	117	43.33%	24	8.89%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	2	66.67%	1	33.33%	3

Flexural Toppling

Flexural Toppling	Critical	%	Total
All Vectors	0	0.00%	150

Direct Toppling

Base Plane	Critical	%	Total
All Vectors	48	32.00%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

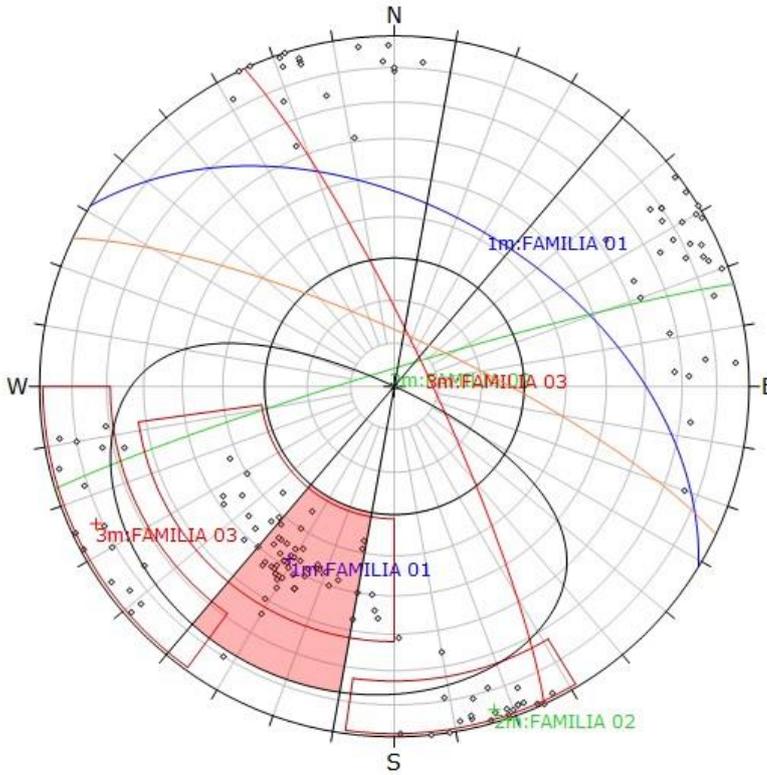
Critical 1 = Direct Toppling (Intersection)

Critical 2 = Oblique Toppling (Intersection)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	132	1.18%	1368	12.25%	11168
All Set Planes	0	0.00%	0	0.00%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	0	0.00%	0	0.00%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3

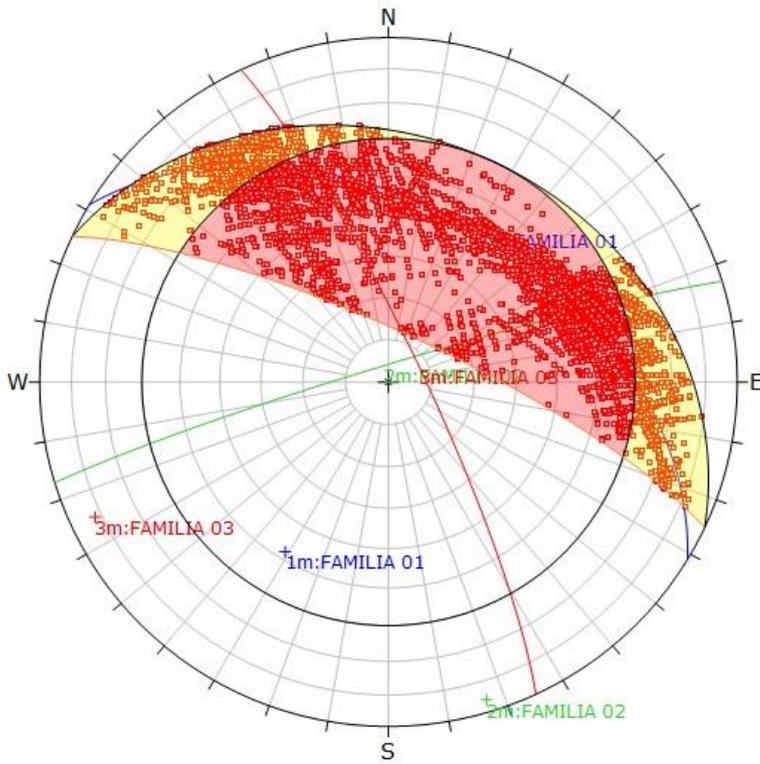
Registro Análisis Cinemático 78 grados

Falla Planar:



Symbol	Feature		
o	Pole Vectors		
Kinematic Analysis Planar Sliding			
Slope Dip	78		
Slope Dip Direction	25		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	15°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	47	150	31.33%
Planar Sliding (Set 1: FAMILIA 01)	46	60	76.67%
Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	48	31	FAMILIA 01
2m	66	343	FAMILIA 02
3m	82	65	FAMILIA 03
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		150 (150 Entries)	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Area	

Falla en Cuña:



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

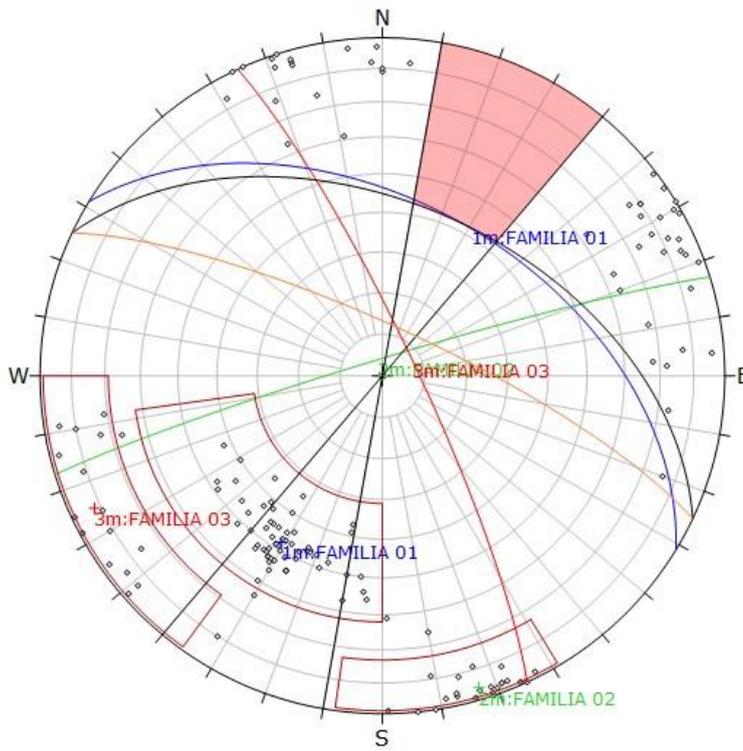
Kinematic Analysis	Wedge Sliding
Slope Dip	78
Slope Dip Direction	25
Friction Angle	30°

	Critical	Total	%
Wedge Sliding	7070	11168	63.31%

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	48	31	FAMILIA 01
2m	86	343	FAMILIA 02
3m	82	65	FAMILIA 03

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	11168
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Falla en vuelco:



Symbol	Feature			
o	Pole Vectors			
Kinematic Analysis				
Flexural Topping				
Slope Dip	78			
Slope Dip Direction	25			
Friction Angle	30°			
Lateral Limits	15°			
Flexural Topping (All)		Critical	Total	%
		0	150	0.00%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	48	31	FAMILIA 01	
2m	86	343	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

INFORME DE ANALISIS CINEMATICO PARA TALUD 78 GRADOS:

Kinematic Analysis

Slope Dip: 78
 Slope Dip Direction: 25
 Friction Angle: 30°
 Lateral Limit Angle: 15°

Planar Sliding

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	47	31.33%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

Planar Sliding (No Limits)

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	65	43.33%	150
Set 1: FAMILIA 01	60	100.00%	60
Set 3: FAMILIA 03	1	6.67%	15

Wedge Sliding

Critical 1 = Wedge Sliding (Both Planes)

Critical 2 = Wedge Sliding (One Plane)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	2216	19.84%	4854	43.46%	11168
All Set Planes	639	28.40%	1232	54.76%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	191	17.69%	861	79.72%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	395	43.89%	369	41.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	53	19.63%	2	0.74%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3

Flexural Toppling

Flexural Toppling	Critical	%	Total
All Vectors	0	0.00%	150

Direct Toppling

Base Plane	Critical	%	Total
All Vectors	47	31.33%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

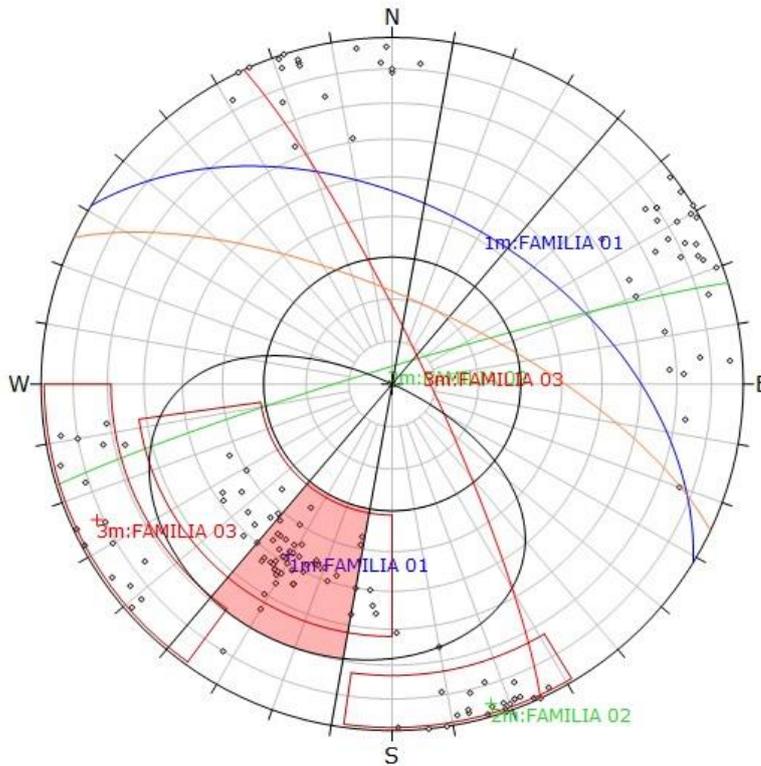
Critical 1 = Direct Toppling (Intersection)

Critical 2 = Oblique Toppling (Intersection)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	132	1.18%	1368	12.25%	11168
All Set Planes	0	0.00%	0	0.00%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	0	0.00%	0	0.00%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3

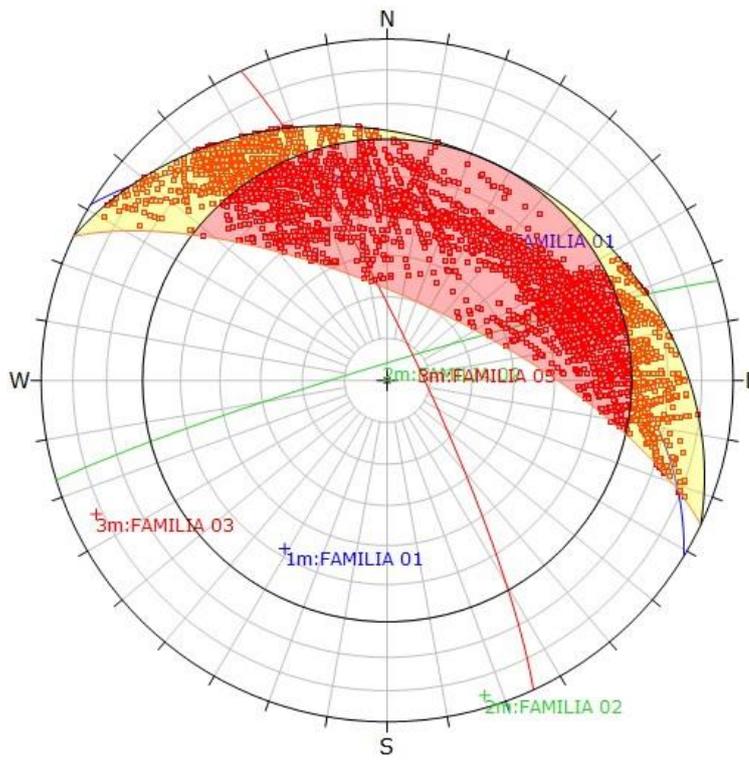
Registro Análisis Cinemático 70 grados

Falla Planar:



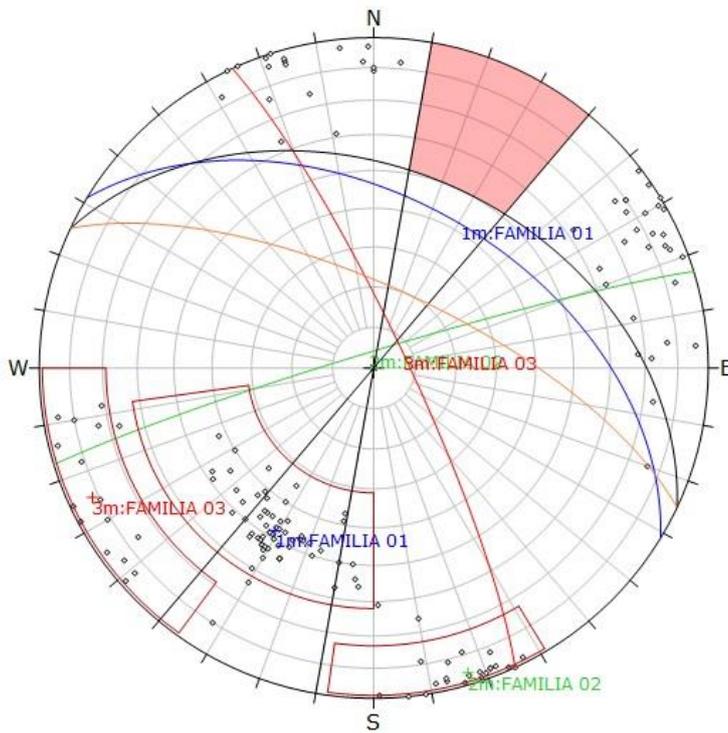
Symbol	Feature			
○	Pole Vectors			
Kinematic Analysis Planar Sliding				
Slope Dip	70			
Slope Dip Direction	25			
Friction Angle	30°			
Lateral Limits	15°			
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		47	150	31.33%
Planar Sliding (Set 1: FAMILIA 01)		46	60	76.67%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	48	31	FAMILIA 01	
2m	86	343	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Falla en Cuña:



Symbol	Feature			
■	Critical Intersection			
Kinematic Analysis Wedge Sliding				
Slope Dip 70				
Slope Dip Direction 25				
Friction Angle 30°				
		Critical	Total	%
Wedge Sliding		6727	11168	60.23%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	48	31	FAMILIA 01	
2m	86	343	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Intersection Mode		Grid Data Planes		
Intersections Count		11168		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

Falla en vuelco:



Symbol	Feature			
o	Pole Vectors			
Kinematic Analysis				
Flexural Toppling				
Slope Dip	70			
Slope Dip Direction	25			
Friction Angle	30°			
Lateral Limits	15°			
Flexural Toppling (All)		Critical	Total	%
		0	150	0.00%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	48	31	FAMILIA 01	
2m	86	343	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

INFORME DE ANALISIS CINEMATICO PARA TALUD 70 GRADOS:

Kinematic Analysis

Slope Dip: 70
 Slope Dip Direction: 25
 Friction Angle: 30°
 Lateral Limit Angle: 15°

Planar Sliding

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	47	31.33%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

Planar Sliding (No Limits)

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	63	42.00%	150
Set 1: FAMILIA 01	60	100.00%	60

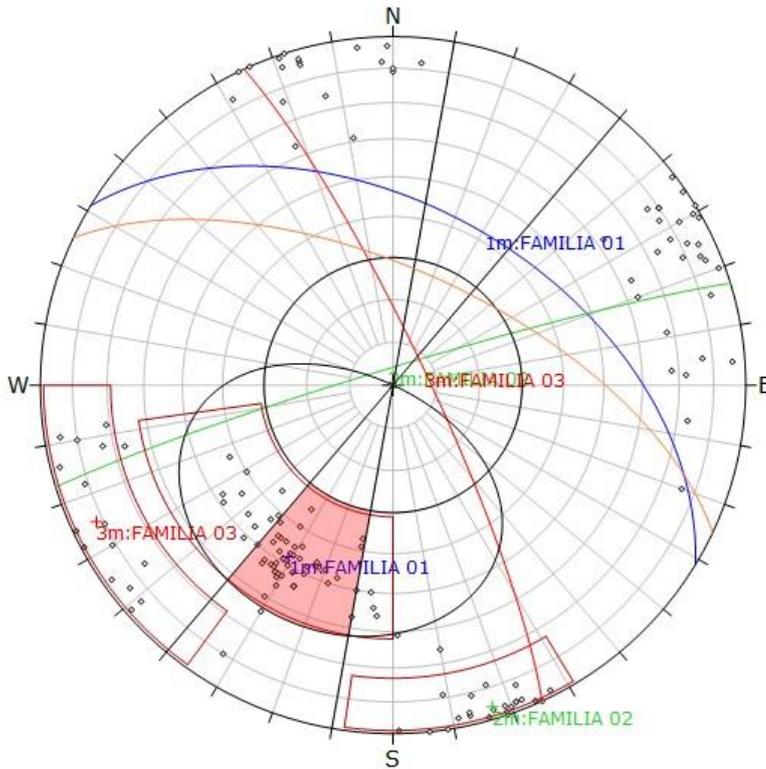
Wedge Sliding

Critical 1 = Wedge Sliding (Both Planes)
 Critical 2 = Wedge Sliding (One Plane)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	1999	17.90%	4728	42.34%	11168
All Set Planes	588	26.13%	1230	54.67%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	191	17.69%	861	79.72%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	395	43.89%	369	41.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	2	0.74%	0	0.00%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3

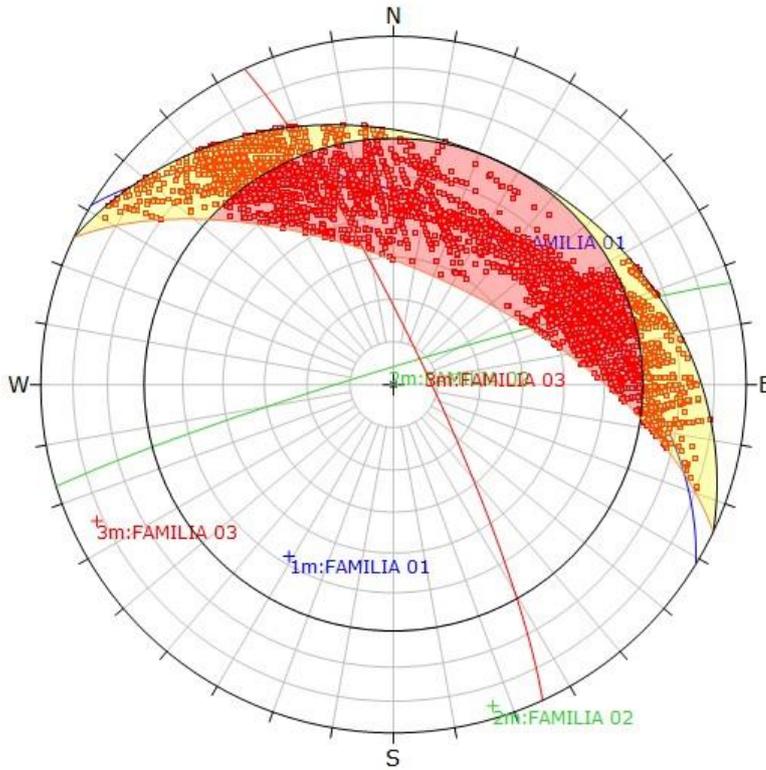
Registro Análisis Cinemático 63 grados

Falla Planar:



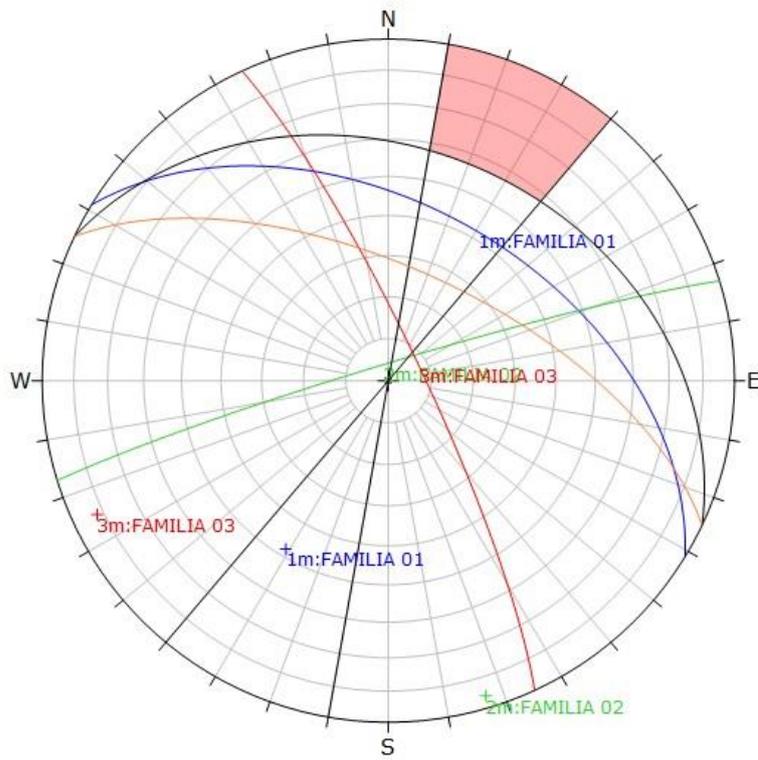
Symbol	Feature		
o	Pole Vectors		
Kinematic Analysis Planar Sliding			
Slope Dip	63		
Slope Dip Direction	25		
Friction Angle	30°		
Lateral Limits	15°		
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	46	150	30.67%
Planar Sliding (Set 1: FAMILIA 01)	16	60	76.67%
Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	48	31	FAMILIA 01
2m	86	343	FAMILIA 02
3m	82	65	FAMILIA 03
Plot Mode	Pole Vectors		
Vector Count	150 (150 Entries)		
Hemisphere	Lower		
Projection	Equal Area		

Falla en Cuña:



Symbol	Feature		
■	Critical Intersection		
Kinematic Analysis Wedge Sliding			
Slope Dip 63			
Slope Dip Direction 25			
Friction Angle 30°			
	Critical Total %		
Wedge Sliding	6302 11168 56.43%		
Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	48	31	FAMILIA 01
2m	86	343	FAMILIA 02
3m	82	65	FAMILIA 03
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		150 (150 Entries)	
Intersection Mode		Grid Data Planes	
Intersections Count		11168	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Area	

Falla en vuelco:



Kinematic Analysis		Flexural Topping		
Slope Dip		63		
Slope Dip Direction		25		
Friction Angle		30°		
Lateral Limits		15°		
		Critical	Total	%
Flexural Topping (All)		0	150	0.00%
Color	Dip	Dip Direction	Label	
Mean Set Planes				
1m	48	31	FAMILIA 01	
2m	86	31.3	FAMILIA 02	
3m	82	65	FAMILIA 03	
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		150 (150 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Area		

INFORME DE ANALISIS CINEMATICO PARA TALUD 63 GRADOS:

Kinematic Analysis

Slope Dip: 63
Slope Dip Direction: 25
Friction Angle: 30°
Lateral Limit Angle: 15°

Planar Sliding

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	46	30.67%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

Planar Sliding (No Limits)

Planar Sliding	Critical	%	Total
All Vectors	60	40.00%	150
Set 1: FAMILIA 01	60	100.00%	60

Wedge Sliding

Critical 1 = Wedge Sliding (Both Planes)
Critical 2 = Wedge Sliding (One Plane)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	1889	16.91%	4413	39.51%	11168
All Set Planes	586	26.04%	1212	53.87%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	191	17.69%	858	79.44%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	395	43.89%	354	39.33%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	1	33.33%	1	33.33%	3

Flexural Toppling

Flexural Toppling	Critical	%	Total
All Vectors	0	0.00%	150

Direct Toppling

Base Plane	Critical	%	Total
All Vectors	46	30.67%	150
Set 1: FAMILIA 01	46	76.67%	60

Critical 1 = Direct Toppling (Intersection)

Critical 2 = Oblique Toppling (Intersection)

Intersection Type	Critical 1	%	Critical 2	%	Total
Grid Data Plane Intersections	132	1.18%	1368	12.25%	11168
All Set Planes	0	0.00%	0	0.00%	2250
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 2: FAMILIA 02 Planes	0	0.00%	0	0.00%	1080
Set 1: FAMILIA 01 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	900
Set 2: FAMILIA 02 vs Set 3: FAMILIA 03 Planes	0	0.00%	0	0.00%	270
User and Mean Set (Unweighted) Plane Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3
User Plane Intersections	No results				
Mean Set Plane (Unweighted) Intersections	0	0.00%	0	0.00%	3

Anexo C: Resultados de Análisis Probabilístico Keyblock

Parámetros de Ingreso para Análisis Keyblock

Ingreso de Data Estructural

Joint sets		Bench Fault & Risk										
	Dip	Dip dir	Range	Spacing	Min	Max	Length	Min	Max	Cohesion (kPa)	Friction (deg)	Include?
1	48.0	31.0	9.5	1.0	0.6	2.5	2.5	0.5	19.0	0.0	35	<input type="checkbox"/>
2	86.0	343.0	6.2	1.0	0.5	2.8	2.3	0.4	10.0	0.0	35	<input type="checkbox"/>
▶ 3	82.0	65.0	11.7	1.2	0.5	3.0	1.5	0.2	6.0	0.0	35	<input type="checkbox"/>
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>
Random	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>

Registro de Análisis Probabilístico talud de 83 grados:

Condición estática:

Parámetros de entrada:

Bench Data	
Bench face dip	83
Bench face dip direction	25
Bench height (m)	20
Bench width (m)	1
Rock density	2352
▶ Seismic Acceleration	0.00

Fault	
<input type="checkbox"/> Include a fault?	
▶ Fault dip	
Fault dip direction	
Friction	
Cohesion (kPa)	

Define risk exposure	
Number of Benches in Stack:	1
Width of Working Bench in m:	1
Standoff distance (m):	1
Personnel Exposure to Rockfalls	
Number of persons	0
Presence (% of 24 hr day)	0
Equipment Exposue to Rockfalls	
Value of equipment (\$)	0
▶ Width occupied (m)	0
Presence (% of 24 hr day)	0

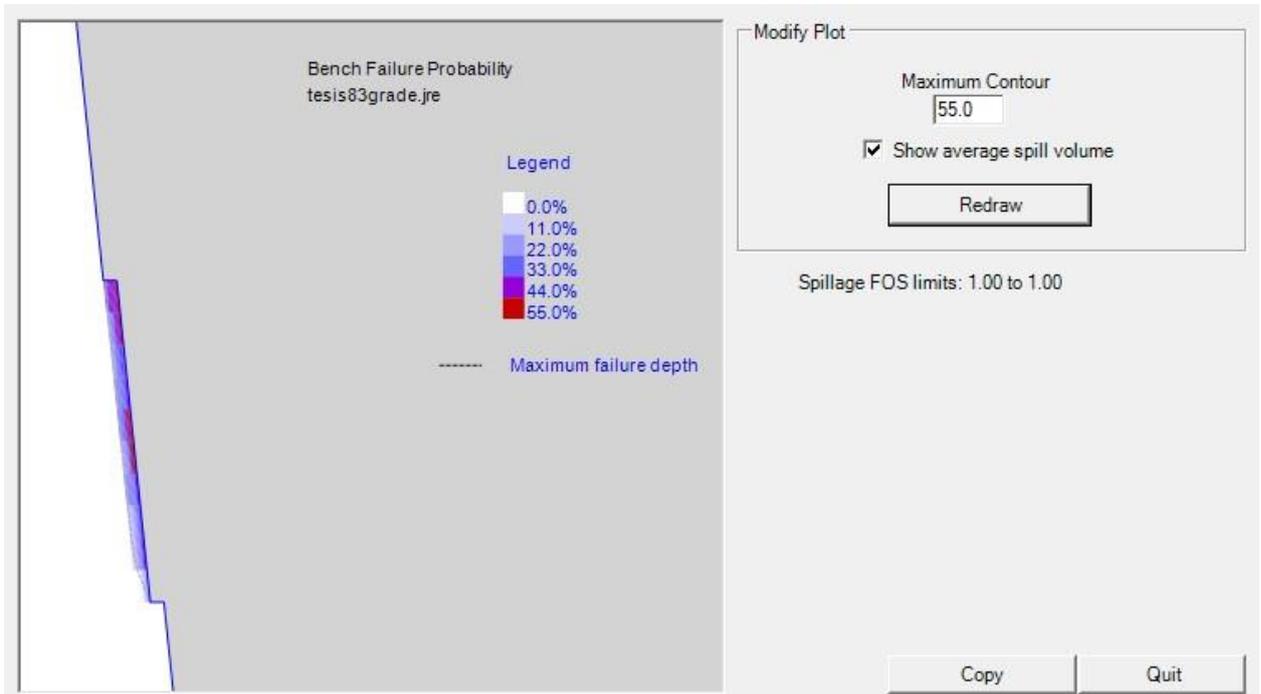
Factor de Seguridad

tesis83grade.jre

▶ RESULTS: 1 benches analysed	
Average Failure Volume (m ³ /m)	6.11
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.77
Average Effective Bench Width (m)	0.64
Failure Free Bench Length (%)	4.0
Average Non-Zero Failure Volume (m ³ /m)	6.36
* Average spillage width (m)	0.00

▶ DATA	
Domain	tesis_grade83
Bench face dip (deg)	83.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0

Probabilidad de Falla



Condición pseudostática:

Parámetros de entrada:

Bench Data	
Bench face dip	83
Bench face dip direction	25
Bench height (m)	20
Bench width (m)	1
Rock density	2352
▶ Seismic Acceleration	0.23

Fault	
<input type="checkbox"/> Include a fault?	
▶ Fault dip	
Fault dip direction	
Friction	
Cohesion (kPa)	

Define risk exposure	
Number of Benches in Stack:	1
Width of Working Bench in m:	1
Standoff distance (m):	1
Personnel Exposure to Rockfalls	
Number of persons	0
Presence (% of 24 hr day)	0
Equipment Exposue to Rockfalls	
Value of equipment (\$)	0
▶ Width occupied (m)	0
Presence (% of 24 hr day)	0

Factor de Seguridad

Results | Run statistics |

tesis83grade.jre

▶ RESULTS: 1 benches analysed	
Average Failure Volume (m ³ /m)	5.95
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.46
Average Effective Bench Width (m)	0.58
Failure Free Bench Length (%)	5.0
Average Non-Zero Failure Volume (m ³ /m)	6.27
* Average spillage width (m)	0.00

▶ DATA	
Domain	tesis_grade83
Bench face dip (deg)	83.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0
Seismic loading (g)	0.23

Probabilidad de Falla



Registro de Análisis Probabilístico talud de 78 grados:

Condición estática:

Parámetros de entrada:

Bench Data	
Bench face dip	78
Bench face dip direction	25
Bench height (m)	20
Bench width (m)	1
Rock density	2352
✎ Seismic Acceleration	0.00

Fault	
<input type="checkbox"/> Include a fault?	
▶ Fault dip	
Fault dip direction	
Friction	
Cohesion (kPa)	

Define risk exposure	
Number of Benches in Stack:	1
Width of Working Bench in m:	1
Standoff distance (m):	1
Personnel Exposure to Rockfalls	
Number of persons	0
Presence (% of 24 hr day)	0
Equipment Exposure to Rockfalls	
Value of equipment (\$)	0
▶ Width occupied (m)	0
Presence (% of 24 hr day)	0

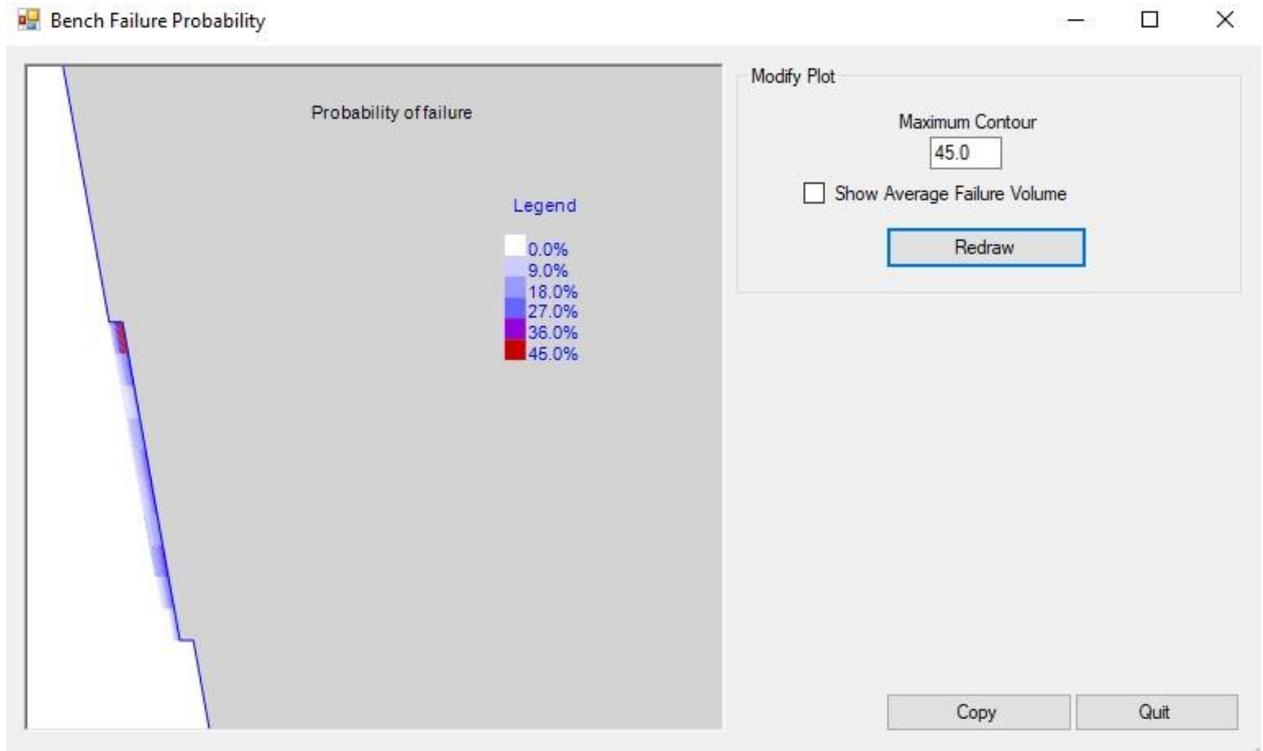
Factor de Seguridad

tesis78grade.jre

RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	5.5
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.84
Average Effective Bench Width (m)	0.7
Failure Free Bench Length (%)	51.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	5.5
* Average Required Bench Width (m)	5.0

DATA	
Domain	tesis78degrees
Bench face dip (deg)	78.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0

Probabilidad de Falla



Condición pseudostática:

Parámetros de entrada:

Joint sets **Bench Fault & Risk**

Bench Data

Bench face dip	78
Bench face dip direction	25
Bench height (m)	20
Bench width (m)	1
Rock density	2352
.. Seismic Acceleration	0.23

Fault Include a fault?

▶ Fault dip	
Fault dip direction	
Friction	
Cohesion (kPa)	

Define risk exposure

Number of Benches in Stack:	1
Width of Working Bench in m:	1
Standoff distance (m):	1
Personnel Exposure to Rockfalls	
Number of persons	0
Presence (% of 24 hr day)	0
Equipment Exposue to Rockfalls	
Value of equipment (\$)	0
▶ Width occupied (m)	0
Presence (% of 24 hr day)	0

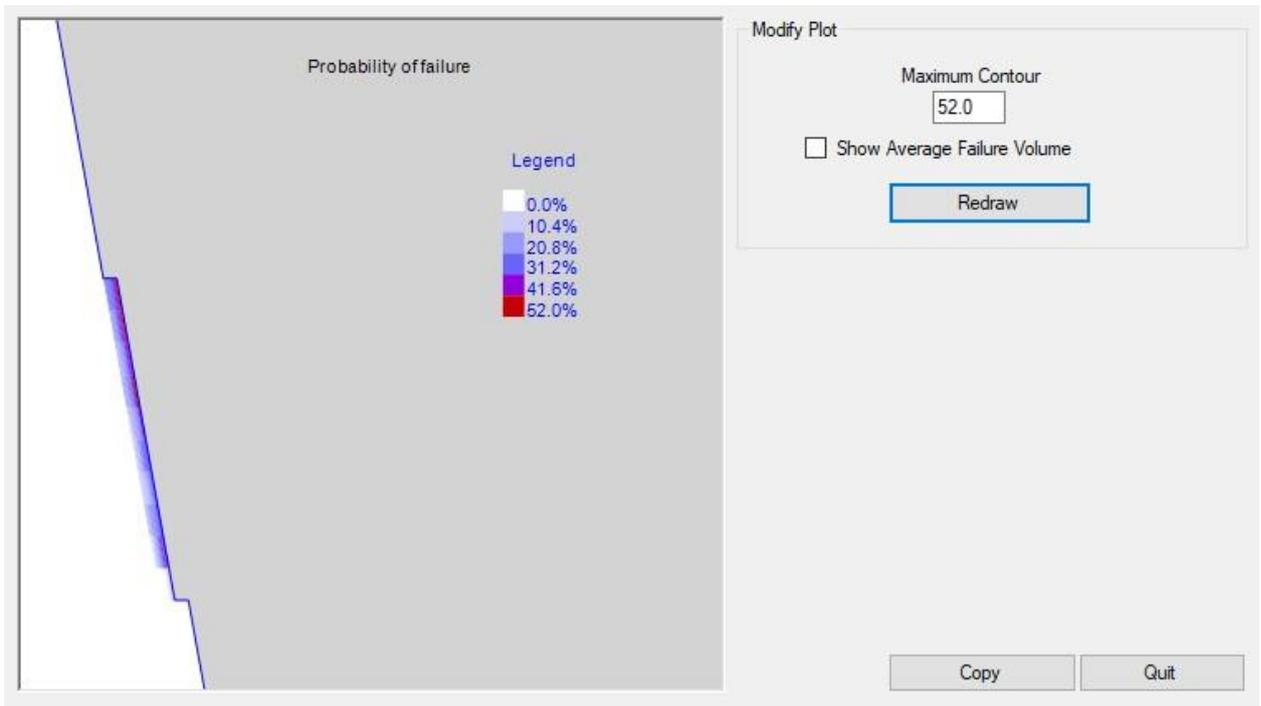
Factor de Seguridad

tesis78grade.jre

RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	4.8
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.61
Average Effective Bench Width (m)	0.8
Failure Free Bench Length (%)	53.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	4.8
* Average Required Bench Width (m)	4.7

DATA	
Domain	tesis78degrees
Bench face dip (deg)	78.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0
Seismic loading (g)	0.23

Probabilidad de Falla



Registro de Análisis Probabilístico talud de 70 grados:

Condición estática:

Parámetros de entrada:

Bench Data	
Bench face dip	70.0
Bench face dip direction	25.0
Bench height (m)	20.0
Bench width (m)	1.0
Rock density	5500
.. Seismic Acceleration	0.00

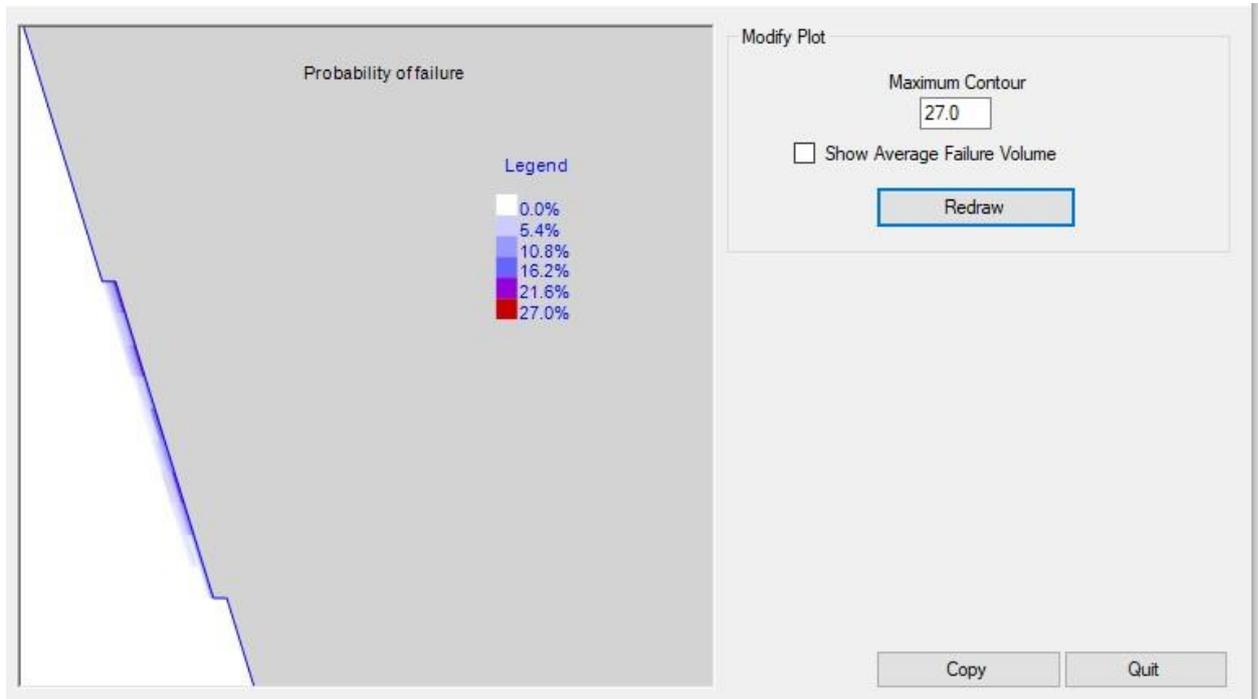
Factor de Seguridad

tesis70grade.jre

RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	1.6
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.95
Average Effective Bench Width (m)	1.0
Failure Free Bench Length (%)	83.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	1.7
* Average Required Bench Width (m)	2.6

DATA	
Domain	tesis70degrees
Bench face dip (deg)	70.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0

Probabilidad de Falla



Condición pseudostática:

Parámetros de entrada:

Bench Data

Bench face dip	70.0
Bench face dip direction	25.0
Bench height (m)	20.0
Bench width (m)	1.0
Rock density	5500
▶ Seismic Accelleration	0.23

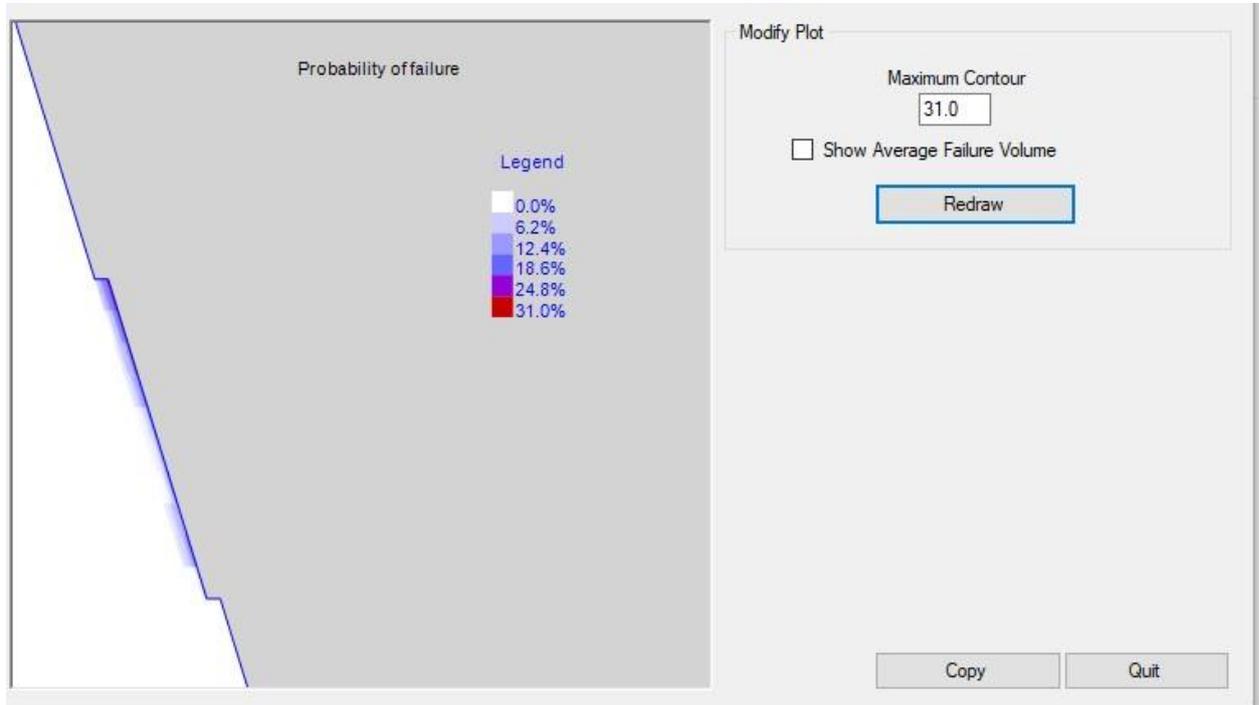
Factor de Seguridad

tesis70grade.jre

RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	1.5
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	0.86
Average Effective Bench Width (m)	0.9
Failure Free Bench Length (%)	81.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	1.6
* Average Required Bench Width (m)	2.5

DATA	
Domain	tesis70degrees
Bench face dip (deg)	70.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0
Seismic loading (g)	0.23

Probabilidad de Falla



Registro de Análisis Probabilístico talud de 63 grados:

Condición estática:

Parámetros de entrada:

Bench Data

Bench face dip	63
Bench face dip direction	25.0
Bench height (m)	20.0
Bench width (m)	1.0
Rock density	5500
▶ Seismic Acceleration	0.00

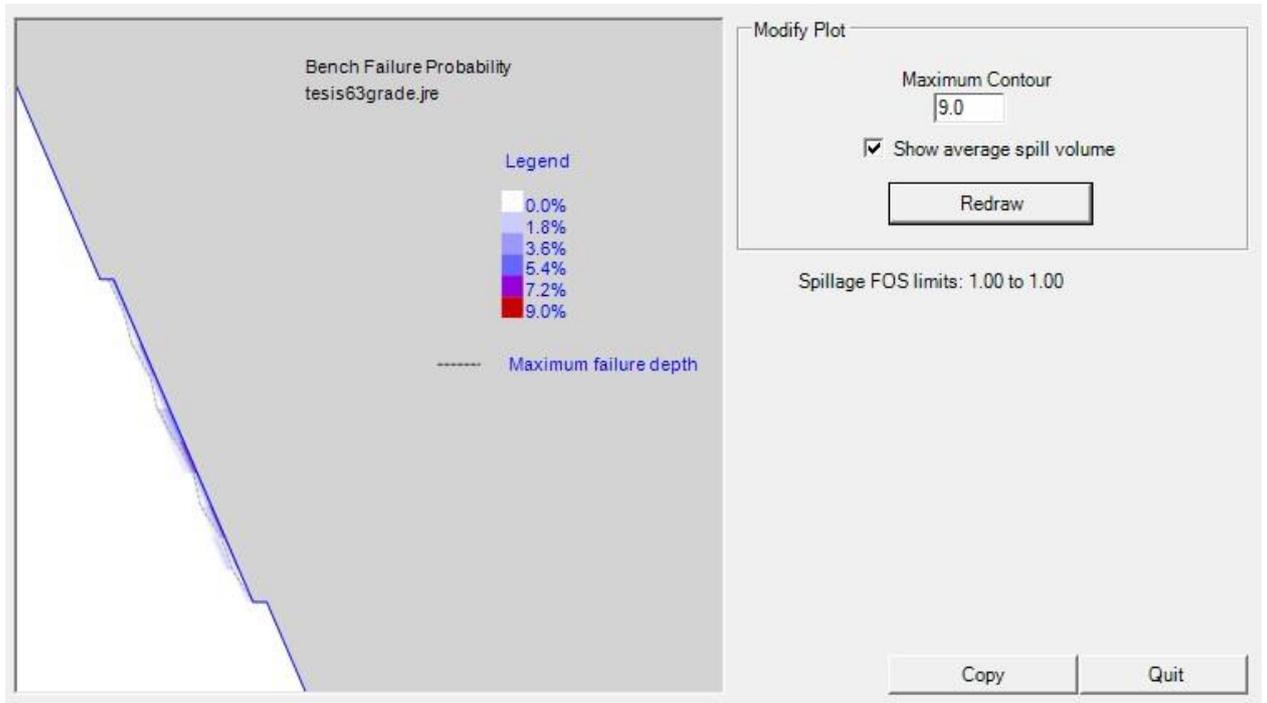
Factor de Seguridad

tesis63grade.jre

▶ RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	0.8
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	1.25
Average Effective Bench Width (m)	1.0
Failure Free Bench Length (%)	93.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	1.1
* Average Required Bench Width (m)	1.7

▶ DATA	
Domain	tesis63degrees
Bench face dip (deg)	63.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0

Probabilidad de Falla



Condición pseudostática:

Parámetros de entrada:

Bench Data

Bench face dip	63
▶ Bench face dip direction	25.0
Bench height (m)	20.0
Bench width (m)	1.0
Rock density	5500
Seismic Acceleration	0.23

Factor de Seguridad

RESULTS	
Average Failure Volume (m ³ /m)	0.7
Average Factor of Safety of Blocks/Wedges	1.14
Average Effective Bench Width (m)	1.0
Failure Free Bench Length (%)	86.0
Average Non-Zero Failure Volume (mi/m)	0.8
* Average Required Bench Width (m)	1.6

DATA	
Domain	tesis63degrees
Bench face dip (deg)	63.0
Bench face dip dir(deg)	25.0
Bench face height (m)	20.0
Design bench width (m)	1.0
Seismic loading (g)	0.23

Probabilidad de Falla

