

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MÍNAS



TESIS

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA PREDICCIÓN
DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCAY-
CUSCO**

PRESENTADO POR:

Bach. GENRY CAYO CARDENAS MORALES

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO DE MINAS**

ASESOR:

Mg. RAIMUNDO MOLINA DELGADO

CUSCO – PERÚ

2024



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

VICE RECTORADO DE INVESTIGACIÓN

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro. CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: **“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA COMPAÑÍA MINERA ANTAPACCA-CUSCO”**

Presentado por **Genry Cayo Cardenas Morales**, con DNI **73482849** y código universitario Nro. **101003** para optar al Título Profesional de: **INGENIERO DE MINAS**. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 03 (Tres) veces, mediante el software antiplagio Turnitin, conforme al Artículo 6° del presente reglamento y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de: **09 % (nueve por ciento)**.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación, tesis, textos, libros, revistas, artículos científicos, material de enseñanza y otros (Art. 7, inc. 2 y 3)

Porcentaje	Evaluación y acciones.	Marque con una X
Del 1 al 10 %	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30%	Devolver al usuario para las correcciones.	-----
Mayores a 31 %	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a ley.	-----

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera hoja del reporte del software antiplagio.

Cusco, 17 de mayo de 2024.



FIRMA

POST FIRMA: Ing. Raimundo Molina Delgado
DNI Nro.: 23912083

ORCID ID: 0000-0003-0291-2700

Se adjunta:

1. Reporte Generado por el sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio:
<https://unsaac.turnitin.com/viewer/submissions/oid:27259:355317032?locale=es> ✓

NOMBRE DEL TRABAJO

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA COM

AUTOR

Genry Cayo Cardenas Morales

RECUENTO DE PALABRAS

27393 Words

RECUENTO DE CARACTERES

149935 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

126 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

6.1MB

FECHA DE ENTREGA

May 16, 2024 8:48 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 16, 2024 8:50 PM GMT-5

● **9% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 9% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Base de datos de trabajos entregados
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 30 palabras)
- Material bibliográfico
- Material citado



DEDICATORIA

Doy gracias a Dios que me ha guiado, que estuvo conmigo, me ayudó en todos los momentos de mi vida y me dio fuerzas para seguir adelante.

A mis padres Florentino y Julia; Me han brindado apoyo incondicional, me ha inspirado a perseguir mis sueños, cuidar de mi progreso y crecimiento profesional.

A mis hermanos Kevin, Jaime, Nicoll, Analuz y a mi novia Rosmery, quienes siempre me apoyaron en diversas situaciones de la vida y me brindaron comprensión y consejos para alcanzar mis objetivos personales y profesionales.

A mis docentes quienes con sus discernimientos enseñaron con temple, empeño y apoyo absoluto me permitieron desplegar en mi vida profesional.

AGRADECIMIENTO

Extender un agradecimiento a mi familia por el apoyo incondicional, el arduo trabajo que siempre han mostrado al inculcarme el valor que se necesita para lograr mis objetivos. Del mismo modo, agradezco sinceramente a la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, la cual es mi alma mater. Asimismo, a la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas, por los conocimientos que mis profesores me han brindado durante mis años de estudio.

También agradezco al Mg. Raimundo Molina Delgado por sus consejos y críticas constructivas durante el desarrollo y gestión de este importante trabajo, que fue crucial para mi desarrollo profesional.

Finalmente quisiera agradecer a mis familiares y amigos que han estado a mi lado, me aconsejaron, buscaron la mejor ayuda para mí y me ayudaron a escribir este trabajo de investigación.

INDICE

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTO.....	ii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
INDICE DE TABLAS	xi
INTRODUCCIÓN	xii
RESUMEN	xiv
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2.1. Problema General.....	3
1.2.2. Problemas Específicos.....	3
1.3. OBJETIVOS	4
1.3.1. Objetivo General	4
1.3.2. Objetivos Específicos	4
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4.1. Justificación de la Investigación.....	4
1.4.2. Importancia de la Investigación	5
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.6.1. Hipótesis General	6
1.6.2. Hipótesis Específicas.....	6
1.7. VARIABLES E INDICADORES	6
1.8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	7

1.8.1. Enfoque de la Investigación	7
1.8.2. Nivel de la Investigación	7
1.8.3. Diseño de la Investigación	8
1.9. POBLACIÓN Y MUESTRA.....	8
1.9.1. Población	8
1.9.2. Muestra.....	8
1.10. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	9
1.10.1. Técnicas de recolección de la información	9
1.10.2. Instrumentos de recolección de datos	10
1.10.3. Procesamiento de datos.....	10
CAPÍTULO II: DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA ANTAPACCAY	12
2.1. UNIDAD DE ESTUDIO	12
2.2. ÁMBITO GEOGRÁFICO.....	13
2.2.1. Ubicación.....	13
2.2.2. Accesibilidad	14
2.2.3. Reseña histórica.....	15
2.3. CLIMA, VEGETACIÓN Y FAUNA.....	15
2.3.1. Clima	15
2.3.2. Vegetación.....	16
2.3.3. Fauna.....	17
2.4. GEOLOGÍA.....	18
2.4.1. Geología Regional	18
2.4.2. Geología local.....	20
2.4.3. Geología Estructural.....	29
2.4.4. Geología Económica y Mineralización	31

2.5. MINERÍA	33
2.5.1. Capacidad de Producción de la Empresa Minera Antapaccay	33
2.6. OPERACIÓN UNITARIA	34
2.6.1. Perforación	34
2.6.2. Voladura	37
2.6.3. Carguío	38
2.6.4. Acarreo	39
2.7. PLANTA METALURGICA.....	41
2.7.1. Proceso de Concentradora Antapaccay	41
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	47
3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	47
3.1.1. Antecedentes a nivel internacional.....	47
3.1.2. Antecedentes a nivel nacional	49
3.1.3. Antecedentes a nivel local	50
3.2. BASES TEORICAS	51
3.2.1. Método de Elementos finitos.....	51
3.2.2. Criterio de Falla de Mohr Coulomb	53
3.2.3. Modelo Drucker-Prager.....	55
3.2.4. Diseño de Bancos	55
3.2.5. Características de los taludes.....	56
3.2.6. Factor de Seguridad.....	59
3.2.7. La Estabilidad de Taludes	60
3.2.8. Análisis de estabilidad de taludes.....	61
3.2.9. Introducción al análisis de estabilidad.....	61
3.2.10. Método de equilibrio límite	61

3.2.11. Método de Dovelas o Rebanadas	62
3.2.12. Método de Fellenius.....	63
3.2.13. Método de Bishop.....	65
3.2.14. Método de Spencer	66
3.2.15. Método de Janbú.....	66
3.2.16. Método de Morgenstern-Price	67
3.3. Estudio Geomecánica	68
3.4. Módulo de Monitoreo	70
3.4.1. Base de Datos	72
CAPÍTULO IV: APLICACIÓN DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES.....	73
4.1. Configuración de cálculo y parámetros de entrada.....	73
4.2. Método de evaluación rápida de la estabilidad de un talud	76
4.3. Modelo de evaluación rápida de factores de seguridad	77
4.3.1. Cálculo de factores de seguridad.....	77
4.3.2. Análisis del factor de ponderación del ángulo de pendiente.	77
4.4. Procedimiento para el análisis de la estabilidad de taludes con elementos finitos.	81
4.5. Procedimiento para el análisis de la estabilidad de taludes con métodos tradicionales	90
4.6. Comparación de métodos de análisis en estabilidad de taludes.....	95
4.6.1. Predicción de la estabilidad de taludes con elementos finitos.....	98
4.6.2. Predicción de la estabilidad de taludes con métodos tradicionales.	100
4.6.3. Análisis de correlación entre los parámetros.....	101
4.6.4. Relación del peso unitario y factor de seguridad respecto al ángulo de fricción interna.	103
4.6.5. Cálculo de la eficiencia del MEF y los métodos tradicionales.....	104
4.6.6. Cuantificación de la precisión de los métodos a través de la matriz de confusión. ...	105

4.6.7. Influencia de la variación de la cohesión en el factor de seguridad.	107
4.6.8. Influencia del agujero triangular del enmallado del MEF en el factor de seguridad.	111
4.6.9. Influencia de la variación del ángulo de fricción interna en el factor de seguridad. ...	112
CAPÍTULO V: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	113
5.1. Respecto al procedimiento.	113
5.2. Estabilidad de taludes y parámetros influyentes en el factor de seguridad.	114
5.3. Evaluación de la precisión de los métodos.	114
5.4. Evaluación de la eficiencia de los métodos	115
5.5. Influencia del triángulo finito	115
5.6. Influencia del ángulo de fricción interna	115
CONCLUSIONES	116
RECOMENDACIONES	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
ANEXOS	133

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 (a) Vías de acceso a la mina Antapaccay, (b) Ubicación de la Mina Antapaccay, (c) Vista general de las excavaciones a tajo abierto	13
Figura 2 Mapa de localización satelital	14
Figura 3 La vegetación en la compañía minera Antapaccay	17
Figura 4 Plano Geológico Regional de la mina Antapaccay	20
Figura 5 Plano Geológico Local de la mina Antapaccay.....	28
Figura 6 Plano Geológico Estructural de la mina Antapaccay	31
Figura 7 Transporte del material triturado con faja transportadora overland	34
Figura 8 Proceso de Perforación con equipo 39 HR BUCYRUS.....	36
Figura 9 Proceso de perforación con equipo 49 HR BUCYRUS	36
Figura 10 Radio de influencia por la voladura.....	37
Figura 11 Carguío con equipo Pala Eléctrica CAT 7495 HD.....	39
Figura 12 Transporte y Acarreo del material fragmentado con camiones.....	40
Figura 13 Acarreo del material fragmentado con CAT 793D	41
Figura 14 Diagrama del proceso de chancado	42
Figura 15 Chancadora primaria giratoria.....	42
Figura 16 Diagrama de flujo del proceso de molienda planta	44
Figura 17 Molienda SAG.....	44
Figura 18 Diagrama de flujo del proceso de flotación planta Tintaya.....	46
Figura 19 a) Caras vistas en un estado tensional b) la resistencia interna del material a la falla	53
Figura 20 Descripción de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb.....	54
Figura 21 Modelo típico del banco	56
Figura 22 Parámetros que definen un talud de mina a cielo abierto	57

Figura 23	Tipos de fallas en deslizamientos rotacionales.....	58
Figura 24	Factores de seguridad aceptables.....	59
Figura 25	Análisis del mecanismo de falla con método de equilibrio límite.....	62
Figura 26	Dovelas de la masa deslizante	63
Figura 27	Fuerzas que actúan sobre una dovela	64
Figura 28	Interpretación gráfica del Método de Bishop	65
Figura 29	Diagrama para determinar el factor de corrección	67
Figura 30	(a)Interfaz de distribución de todos los sensores de monitoreo, (b) Realidad aumentada para la visualización de instrumentos, (c) Central de control despacho geotécnico	71
Figura 31	Plano de la zona geotécnica en estudio	72
Figura 32	Configuración del talud para el análisis con MEF	75
Figura 33	Modelo típico de talud.....	79
Figura 34	Zona de estudio-Área Geotecnia	79
Figura 35	Diagrama de flujo del análisis de estabilidad	80
Figura 36	Imágenes de análisis de estabilidad de taludes.....	81
Figura 37	Parámetros geotécnicos de los suelos.....	84
Figura 38	Parámetros de los suelos y rocas	85
Figura 39	Cuadro de análisis y cálculo del factor de seguridad (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m ²	86
Figura 40	Configuración de la sobrecarga en el talud	87
Figura 41	Configuración de anclaje del talud	88
Figura 42	Resultado del análisis de la estabilidad del talud con anclaje de seguridad.....	89
Figura 43	Configuración de la carga sobre la franja para el análisis con otros métodos.....	90
Figura 44	Resultado del análisis Bishop.....	92
Figura 45	Resultado del análisis con todos los métodos con tipo de análisis estándar (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m ²	93

Figura 46	Análisis de la estabilidad del talud con superficie deslizante poligonal	94
Figura 47	Características geotécnicas de los suelos y rocas	95
Figura 48	Resultados del análisis de estabilidad con el MEF - tres capas de suelo (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m ²	96
Figura 49	Resultados del análisis de estabilidad con otros métodos - tres capas de suelo (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m ²	97
Figura 50	Análisis de correlación	102
Figura 51	Relación del ángulo de fricción interna el peso unitario y el factor de seguridad	103
Figura 52	Comparación de la curva ROC entre el MEF y el método Bishop	104
Figura 53	Matriz de confusión para predicciones con elementos finitos.....	105
Figura 54	Matriz de confusión de las predicciones de los métodos tradicionales	106
Figura 55	Mapa de colores de la evolución del factor de seguridad respecto a la variación de la cohesión	108
Figura 56	Gráfico del factor de seguridad en función de la variación de la cohesión	110
Figura 57	Influencia del lado del triángulo infinitesimal en el cálculo del factor de seguridad	111
Figura 58	Variación del Factor de seguridad respecto al ángulo de fricción interna	112

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Variable dependiente e independiente	7
Tabla 2	Extracto de la base de datos de parámetros geotécnicos de taludes	9
Tabla 3	Vías de Acceso a la mina Antapaccay	14
Tabla 4	Equipos de perforación de la mina Antapaccay.....	35
Tabla 5	Equipos de Carguío que operan en la mina Antapaccay	38
Tabla 6	Equipos de Acarreo que Operan en Mina Antapaccay	40
Tabla 7	Criterios de clasificación de la masa rocosa	68
Tabla 8	Clasificación de la masa rocosa	69
Tabla 9	Aberturas máximas de las excavaciones permanentes	70
Tabla 10	Datos de los parámetros requeridos para el análisis	78
Tabla 11	Parámetros considerados en el diseño del talud con elementos finitos	82
Tabla 12	Coordenadas de la superficie de taludes a analizar.....	83
Tabla 13	Determinación del factor de seguridad con el método de elementos finitos (MEF)99	
Tabla 14	Cálculo del factor de seguridad utilizando métodos tradicionales	101
Tabla 15	Resultados de la evolución del factor de seguridad y la cohesión para todos los métodos	109

INTRODUCCIÓN

Hoy en día un procedimiento esencial es el análisis de la estabilidad de taludes. Esto a raíz de que gran cantidad de deslizamientos de taludes generan externalidades económicas y sociales. Así, esta investigación se enfoca en cuantificar la estabilidad de taludes con más precisión evaluando la estabilidad de taludes junto con la realización de los tratamientos necesarios de una forma confiable y eficiente de prevención y mitigación de deslizamientos.

En la actualidad, los procedimientos de análisis de la estabilidad de taludes esencialmente incluyen métodos de evaluación del factor de seguridad basados en análisis pseudoestático (que en adelante se les hará referencia como métodos tradicionales), métodos de evaluación de desplazamiento permanente basado en análisis de bloques deslizantes de Newmark y simulación numérica, este último corresponden a métodos basados en el análisis de la tensión y deformación con métodos como elementos finitos, diferencias finitas y métodos de elementos discretos. Los métodos de simulación numérica necesitan obtener una gran cantidad de parámetros físicos y mecánicos, además el costo computacional del cálculo es mucho mayor al de los métodos pseudoestáticos (o métodos tradicionales). Es por ello por lo que el método de los elementos finitos es más preciso como un método de simulación numérica en particular.

Por otro lado los métodos pseudoestáticos que comprenden los métodos: Bishop, Fallenius/Petterson, Spencer, Janbú y Morgenstern-Price llevan a cabo estimaciones de la estabilidad de taludes con un enfoque conservador los cuales solo consideran peso unitario ángulo de fricción interna cohesión del suelo y peso unitario mientras que el método de elementos finitos considera parámetros como peso unitario ratio de Poisson módulo de elasticidad módulo de carga y descarga, ángulo de fricción interna cohesión del suelo, ángulo de dilatación y peso unitario saturado, es así que se considera estos parámetros en elementos finitos ya que hace que las estimaciones del factor de seguridad sean más precisas respecto a los métodos pseudoestáticos.

En el CAPÍTULO I, se muestra detalladamente la existencia del problema con pruebas basadas en artículos científicos, de acuerdo a ello iniciamos formulando el problema general para proseguir con los problemas específicos, se justifica la importancia de la investigación con referencias de

investigaciones internacionales, también se muestra los alcances y las respectivas limitaciones que suelen presentarse en una investigación, también se plantea las hipótesis tanto general como específicas, de la misma manera se plantea el objetivo general como específicas, se muestra también de forma explícita la población y la muestra y las técnicas e instrumentos e recolección de datos mencionando la forma como se llevará a cabo el procesamiento de la información obtenida.

Con respecto al CAPÍTULO II, está enmarcado en una explicación completa de la unidad minera Antapaccay haciendo referencia al ámbito geográfico, clima, vegetación y fauna, en lo referente a la geografía se menciona la geología regional, local, estructural y el potencial económico que tiene n los yacimientos mineros. También se menciona las características de los taludes (objeto de estudio principal), características de perforación, voladura, carguío y acarreo características que de alguna forma pueden influir en la estabilidad de los taludes.

En el CAPÍTULO III, se menciona el marco teórico, dentro del cual están inmersos los antecedentes en el área local como internacional para esta investigación. Se menciona también las bases teóricas como elementos finitos, diseño de banco, la teoría del factor de seguridad, los métodos existentes para el análisis de estabilidad de taludes y la base de datos del cual se llevarán a cabo los análisis.

En el CAPÍTULO IV, se muestra la aplicación de los elementos finitos con el fin de predecir la estabilidad de taludes, con configuración detallada, cálculo de parámetros de entrada. Es así que se hizo una comparación entre el modelo de estimación de la estabilidad de taludes, la valuación del factor de seguridad, el método para el análisis de la estabilidad de taludes con elementos finitos y otros métodos. También se hace un análisis descriptivo de correlación entre parámetros para identificar los parámetros más influyentes y así a partir de los resultados de correlación se analiza el comportamiento de la variación de los factores como el peso unitario el ángulo de fricción interna, la cohesión frente al factor de seguridad, realizándose también el cálculo de la eficiencia del método de los elementos finitos y los métodos tradicionales.

En el CAPÍTULO V, se desarrolla el análisis y discusión de los resultados principalmente de describe e interpreta las estimaciones obtenidas del factor de seguridad y el grado de influencia que pueden tener la variación de algunos parámetros, para luego sacar conclusiones referentes a las problemas e hipótesis planteadas al inicio de la investigación.

RESUMEN

Mediante una rigurosa revisión de la literatura sobre los diversos métodos existentes para determinar la estabilidad de taludes mediante determinación del factor de seguridad. Este estudio se resume en la necesidad de obtener un método confiable que determine la estabilidad de taludes ya que el uso de métodos como Bishop, Spencer, etc., no fueron asertivos en sus estimaciones (o predicciones), por ello se propone la aplicación del método de elementos finitos para determinar la estabilidad de taludes. Para realizar el análisis con el método de los elementos finitos se utilizó una base de datos en la que figuran valores de los siguientes parámetros geotécnicos: peso unitario (γ), cohesión (C), ángulo de fricción interna (ϕ), ángulo de inclinación de la pendiente (β), altura de la pendiente (H) y el coeficiente de presión de agua intersticial (u). Partiendo de ello se determinó el factor de seguridad con elementos finitos y métodos tradicionales como: Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Janbú, Morgenstern – Price. Los resultados de estabilidad fueron comparados con la base de datos y entre los métodos. Además, se determinó el grado de influencia de los parámetros del factor de seguridad, los cuales fueron la cohesión, el ángulo de fricción interna, el peso unitario y se identificó un parámetro adicional para elementos finitos que fue el tamaño del agujero del enmallado, esto se obtuvo a través de una matriz de correlación, estas correlaciones fueron graficados y mostrados para una mejor visualización. La precisión del método de elementos finitos y los métodos tradicionales se determinó a través de la obtención de las matrices de confusión, los resultados llevaron a concluir que el método de elementos finitos es el método más preciso que los métodos tradicionales al determinar la estabilidad de taludes, Adicionalmente se obtuvo la curva ROC-AUC que es un indicador que cuantifica la eficiencia del método a la hora de diagnosticar el factor de seguridad. De los resultados se observó que el método de elementos finitos fue el más eficiente en comparación a los métodos tradicionales. De ese modo se concluyó que el método de los elementos finitos es útil y confiable para determinar la estabilidad de taludes.

Palabras claves: Estabilidad de taludes, factor de seguridad, método de elementos finitos.

ABSTRACT

Through a rigorous review of the literature on the various existing methods to determine the stability of slopes by determining the safety factor. Here we need to obtain a reliable method that determines the stability of slopes since the use of methods such as Bishop, Spencer, etc., were not assertive in their estimates (or predictions), therefore the application of the finite element method to determine the stability of slopes. To carry out the analysis with the finite element method, a database was used that contains values of the following geomechanical parameters: Unit Weight (γ), Elastic Modulus (E), Poisson's Ratio (ν), Saturated Unit Weight (γ_{sat}), Load and discharge module (Eur), Angle of internal friction (ϕ), Soil Cohesion (C_{ef}), Angle of dilation (ψ). Based on this, the safety factor was determined with finite elements and traditional methods such as: Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Janbú, Morgenstern – Price. The stability results were compared with the database and between the methods. In addition, the degree of influence of the safety factor parameters was determined, which were cohesion, the angle of internal friction, the unit weight and an additional parameter for finite elements was identified, which was the size of the mesh hole, this was obtained through a correlation matrix, these correlations were graphed and displayed for better visualization. The precision of the finite element method and the traditional methods was determined by obtaining the confusion matrices, the results led to the conclusion that the finite element method is the more precise method than the traditional methods when determining the stability of slopes. Additionally, the ROC-AUC curve was obtained, which is an indicator that quantifies the efficiency of the method when diagnosing the safety factor. From the results, it was observed that the finite element method was the most efficient compared to traditional methods.

Keywords: Slope stability, safety factor, finite element method.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

A raíz de que en varios sectores del proyecto de integración en el tajo sur (de la minera Antapaccay), los taludes abarcan los estratos de suelos propensos a la erosión producto de la filtración hídrica y movimientos sísmicos producto de la misma actividad minera, lo que hace que modifique la geometría de los taludes. Esta modificación, sumado a la potencia de carga inicial hacen que se incrementen los riesgos de inestabilidad, porque se han observado deslizamientos, ya sea por saturación o vibración de capas generadas por la voladura. Esto ocurre principalmente porque no se consideró los parámetros pertinentes que son intrínsecos de la estabilidad del talud y por el uso de método equivocado para el diseño del talud, debido a que los parámetros geotécnicos considerados en la determinación de la estabilidad inicial fueron los mismos en caso de todos los suelos, como si fueran un único estrato. En general el análisis de estabilidad de taludes es uno de los problemas más frecuentes y críticos en proyectos de ingeniería minera y geotecnia, tales como operaciones mineras a tajo abierto, presas, terraplenes, presas de tierra, rellenos sanitarios y carreteras. Según la revisión de la literatura, usualmente una pendiente tiende a fallar a causa de mecanismos complejos como, deformación interna, fractura frágil, fluencia progresiva, licuefacción de capas de suelos más débiles (Chen & Chameau, 1983; Duncan J, 1996; Eberhardt,

2003). El diseño inicial de las simulaciones en muchos casos puede garantizar la estabilidad de un talud y adicionalmente predecir el tiempo de estabilidad del talud (esto es, tiempo en el que el talud no experimentará deslizamiento). Las tareas de diseño y predicción de la estabilidad de los taludes son muy factibles ya que existen, muchos métodos analíticos para determinar la estabilidad de los taludes como, el método sueco de deslizamiento circular o el método ordinario de rebanadas, los cuales pertenecen al conjunto de métodos de elementos finitos. Así como los métodos mencionados existen una gran variedad. Estos métodos demuestran cierto grado de precisión en la predicción de la estabilidad de taludes. Esta precisión en muchos casos no son suficientes, así lo demuestra el trabajo reciente desarrollado por (Bui et al., 2020), el cual determina la estabilidad de taludes con alturas de hasta 15 metros utilizando métodos de Bishop, Spencer, Jambú, y Fellenius y los comparó con resultados reales medidos en campo y concluyó que el problema radica en que los métodos llevan a cabo la determinación del factor de seguridad sin considerar adecuadamente las características del comportamiento finito del suelo, cuando en realidad se debería considerar el comportamiento infinitesimal, y condiciones de estabilidad sísmica. Este último se debe a los movimientos sísmicos que generan las maquinarias de excavación, los vehículos de carga pesada que transportan material y la misma erosión y filtración hídrica.

De todo lo expuesto anteriormente, queda claro que existen problemas en el diseño de taludes al no considerar parámetros intrínsecos como el ángulo de dilatación, módulo elástico y módulo de carga y descarga. Adicionalmente los métodos tradicionales como Bishop, Spencer, fellenuis, Jambú y Morgenstein no consideran el modelo Drucker-Prager para la simulación del suelo-roca, tampoco consideran el análisis por unidad finita de suelo como si lo hace el método de elementos finitos, por lo que el valor del factor de seguridad no se puede determinar con precisión. Es por ello que de acuerdo la revisión de la literatura, se aplicará el método de elementos finitos

para determinar la estabilidad de taludes en las excavaciones del tajo sur - Antapaccay. El análisis por elementos finitos es un método sofisticado que permite llevar a cabo un análisis integral de la estructura en detalle considerando cada elemento como una unidad finita, esto con el objetivo de estimar la estabilidad de las estructuras geomecánicas considerando la interacción entre partículas finitas de suelo ya que estas interacciones tienen un impacto en la estructura global (Ukritchon y Keawsawasvong, 2019). Este método también fue utilizado ampliamente para determinar la estabilidad de taludes en forma de muros de contención (Liu et al., 2020).

Al aplicar el método de elementos finitos, se pretende encontrar los parámetros que más influyen en la estabilidad de taludes con las propiedades geotécnicas del talud en las excavaciones del tajo sur.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema General

P. ¿En qué medida influye la aplicación del método de elementos finitos en la determinación de la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay?

1.2.2. Problemas Específicos

P1. ¿Cuáles son los parámetros geotécnicos que influyen en la aplicación del método de elementos finitos al determinar la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?

P2. ¿Cuál es la precisión del método de elementos finitos para determinar la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?

P3. ¿Cuál es la eficiencia del método de elementos finitos en la determinación de la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

- O.** Determinar la estabilidad de taludes utilizando el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.

1.3.2. Objetivos Específicos

- O1.** Determinar los parámetros geotécnicos que influyen en la determinación de la estabilidad de taludes al aplicar el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.
- O2.** Determinar la precisión de las predicciones en la estabilidad de taludes al aplicar el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.
- O3.** Determinar la eficiencia del método de elementos finitos para determinar la estabilidad de taludes en la Mina Antapaccay.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. Justificación de la Investigación

Particularmente existe el interés en contribuir en la disminución del colapso de taludes en la minera Antapaccay debido a la existencia de fallas en taludes por los deficientes métodos analíticos aplicados que inciden en el cálculo del factor de seguridad, desembocando en una mayor tasa de exposición a accidentes durante el proceso de extracción de minerales. Agravándose por las características geomecánicas y los parámetros a considerar, además de ello en la minera Antapaccay el proyecto del tajo sur se encuentra en la etapa de ejecución, donde se llevan a cabo las excavaciones a tajo abierto.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende utilizar el método de elementos finitos para determinar la estabilidad de taludes en la etapa de diseño, teniendo en cuenta de las características

geotécnicas en taludes con alturas promedio aproximado de 50 metros. En esta zona del proyecto es necesario predecir con exactitud la estabilidad de taludes en la etapa de diseño para garantizar la seguridad, estabilidad y evitar pérdidas económicas, desastres y casos fortuitos que genera el deslizamiento de taludes cuando se lleva a cabo las actividades mineras.

Por otro lado, la predicción de deslizamientos de taludes depende en gran medida del uso adecuado de las herramientas de análisis computacional y los métodos matemáticos aplicados a la geotécnica. En consecuencia, la determinación de la estabilidad de taludes permite evitar principalmente pérdidas económicas y pérdida de vidas humanas (Basahel & Mitri, 2017), estos son los motivos por los cuales está orientada la presente investigación y que constituye una justificación social.

De todo lo expuesto anteriormente, el presente proyecto, pretende contribuir con la disminución de pérdidas de vidas humanas y contribuir con la seguridad del personal durante la ejecución de las actividades mineras. Por lo tanto, se pretende disminuir pérdidas económicas producto del colapso o deslizamiento de taludes.

1.4.2. Importancia de la Investigación

La importancia de este trabajo de investigación radica en contribuir en la incidencia en la mejora de la seguridad del personal que opera en el proceso de extracción de la materia prima, reduciendo las pérdidas humanas y económicas producto del colapso o deslizamiento de taludes.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

El desarrollo del presente proyecto quedaría limitado a los inconvenientes de los avances tecnológicos futuros, como consecuencia de ello, su aplicabilidad puede quedar obsoleto.

En este contexto el desarrollo y la aplicación del método de elementos finitos, valiéndose de los datos tomados en campo y de los softwares computacionales, deja su aplicabilidad limitada por las actualizaciones futuras de los softwares de análisis geotécnico.

Mientras que el alcance que se pretende obtener, conduce hasta la etapa de prueba con datos reales que han sido obtenidos como resultado de la recopilación documental.

1.6. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Hipótesis General

H.- La aplicación directa del método de elementos finitos es determinar la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.

1.6.2. Hipótesis Específicas

H.1. La determinación de los parámetros geotécnicos influyentes aplicando el método de elementos finitos permite determinar la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.

H.2. La aplicación del método de elementos finitos permite determinar la estabilidad de taludes con precisión en la mina Antapaccay.

H.3. La aplicación del método de elementos finitos permite determinar con eficiencia la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.

1.7. VARIABLES E INDICADORES

Variable dependiente: Determinación de la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.

Variable independiente: Aplicación del método de elementos finitos.

Tabla 1*Variable dependiente e independiente*

Variable dependiente	Indicador	Unidades
Determinación de la estabilidad de taludes	Factor de seguridad	(Adimensional)
Variables independientes	Indicador	Unidades
Aplicación del método de elementos finitos.	Curva ROC -AUC	(Adimensional)
	Coeficiente de correlación	(Adimensional)
	Resultados de matriz de confusión	(Adimensional)

Nota. Elaboración propia.

1.8. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

1.8.1. Enfoque de la Investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, porque busca medir la realidad que se investiga cuantificando las variables ya que se va realizar el análisis de la eficiencia del método de elementos finitos (MEF), la evaluación de los resultados mediante indicadores numéricos como la Curva ROC – AUC y el coeficiente de correlación (Hernández et al , 2019, p. 36).

1.8.2. Nivel de la Investigación

El nivel de la investigación es explicativo, analítica basada en el análisis profundo de la información obtenida, utilizado en el procesamiento de datos, también de tipo aplicativo, que tiene enlace con el diseño de investigación para ser aplicado en el campo para establecer los valores reales, luego procesarlos y probar la efectividad del MEF en comparación con los métodos tradicionales, ya que buscamos entender la relación entre las variables (Hernández et al , 2019, p. 91).

1.8.3. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es experimental porque se manipularán las variables independientes para estudiar sus efectos (causa-efecto), es decir se va manipular la cohesión y el ángulo de fricción interna para así ver la evolución del análisis de factor de seguridad (Hernández et al , 2019, p. 129).

1.9. POBLACIÓN Y MUESTRA

1.9.1. Población

La población es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes (Arias, 2012). La población está caracterizada por el número total de 20 registros de taludes del tajo sur, proporcionados por el área de geotecnia de la Mina Antapaccay.

1.9.2. Muestra

Como estamos trabajando con una población finita, la elección de la muestra se llevó a cabo por muestra por conveniencia (Flames Gonzales, 2012). El cual se seleccionó 16 taludes las cuales representan a la población para llevar a cabo el análisis con el método de elementos finitos y los métodos tradicionales esta estrategia se adoptó de acuerdo a la literatura (Arshad, Babar, & Javed, 2017). Tal como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2*Extracto de la base de datos de parámetros geotécnicos de taludes*

Talud	Ubicación	H	γ	cef	ϕ_{ef}	E	v	γ_{sat}	Eur	ψ	Estabilidad	Tipo de Suelo/Roca
1		8.23	20	95	45	25	0.2	26	28	0.01	Estable	limo gravoso
2		3.66	28	145	50	250	0.1	30	280	0.01	Estable	roca caliza
3		30.5	41	138	44	320	0.2	48	330	0	Estable	rocas de arenisca
4		30.5	27	148	41	227	0.3	31	284	0	Estable	rocas de arenisca
5		51	38.68,27,41.65	176,173,173	46,42,42	302	0.2	37	397	0	Estable	rocas de grava, caliza y arenisca
6		100	20	57	25	115	0.2	22	165	0	Falla	rocas de grava, caliza y arenisca
7	Tajo sur	40	23	170	34	225	0.21	24	237	0	Estable	rocas de arenisca - caliza
8		50	21	75	37	217	0.2	25	246	0.11	Falla	rocas de arenisca
9		88	22	79	31	219	0.2	23	233	0.09	Falla	rocas de arenisca
10		120	26	91	38	215	0.13	19	234	0.02	Estable	rocas de arenisca - caliza
11		48	24,22	178,170	34,32	227	0.19	28	238	0.01	Falla	Limo gravoso y arenisca
12		6	20	170	32	223	0.2	22	230	0	Estable	rocas de arenisca
13		6	27	155	73	277	0.35	31	283	1.7	Estable	rocas de arenisca - caliza
14		10	41	93	73	115	0.22	41	137	0.5	Estable	rocas de arenisca
15		20	53	112	67	193	0.47	63	213	0.97	Estable	rocas de arenisca
16		50	48	171	72	112	0.05	50	118	0.14	Estable	rocas de arenisca

Nota. Tomado del Área Geotecnia Tajo Sur.

1.10. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

La herramienta para la recolección de los datos es el análisis documental, que consiste en la recopilación de las bases de datos que contengan registros de los valores de los parámetros para diferentes zonas de tajo sur.

1.10.1. Técnicas de recolección de la información

Las principales técnicas e instrumentos que utilizaremos en la investigación son:

a) Técnica Documental.

Instrumento: Análisis documental.

Archivo de registro

b) Técnica de Observación.

Instrumento: Informe general del área de geotecnia.

c) Técnica de simulación.

Instrumento: El diseño de los taludes y la determinación del factor de seguridad se realizó con el software Geo5 Versión 2022, mientras que el gráfico de algunos resultados se realizó utilizando la librería matplotlib de Python.

1.10.2. Instrumentos de recolección de datos

Los datos se recopilaron a través del análisis documental de reportes de la unidad del tajo sur – Minera Antapaccay. Este se considera como instrumento válido, como lo define (Robledo Mérida, 2006), el cual sostiene que las fichas de recopilación de datos mostrados en el anexo 6, son los materiales útiles y que se identifican como instrumentos válidos que sustentan una investigación, Por ello en la presente investigación se utiliza datos reportados por la unidad minera.

1.10.3. Procesamiento de datos

El análisis que se lleva a cabo en la presente investigación pasa por llevar a cabo un análisis explicativo hasta concluir en un análisis inferencial, ya que el producto final es aportar con un método analítico, que permita determinar la estabilidad del talud en la etapa de diseño.

La herramienta principal para llevar a cabo el proyecto es un ordenador con capacidad de 12 Gigas de RAM como mínimo. Además, se requiere el software Geo5 Versión 2022, para el desarrollo de los métodos basados en elementos finitos, el cual es un software para el análisis de taludes. El procesamiento de datos inicia, con el ingreso de las coordenadas de los taludes en el

software Geo5 Versión 2022; y seguidamente con la configuración del enmallado y la configuración del tipo de suelo, etc. Todos los detalles del análisis se muestran en la sección 4.4.

El procesamiento de los datos traerá como resultado, la evaluación del factor de seguridad y con este resultado se determinará la estabilidad de los taludes a través del indicador de error o incertidumbre (Arshad et al., 2017; Basahel & Mitri, 2017; Bui et al., 2020; Chakraborty & Goswami, 2017; Dyson & Tolooiyan, 2019; Eberhardt E., 2008; Essa & Elhussein, 2020; Gao et al., 2020; Kannan et al., 2017; Hazari et al., 2020; Jellali & Frikha, 2017; Luo et al., 2021; Michalowski & Martel, 2011; Qi & Tang, 2018; Vick et al., 2020; Zain & Abd, 2009; Naghadehi et al., 2013).

Las herramientas que se van a utilizar es el software Geo5 Versión 2022 (el cual es un software de análisis geotécnico y simulación de taludes) y para el análisis estadístico se utilizó la librería matplotlib de Python.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD MINERA ANTAPACCAY.

2.1. UNIDAD DE ESTUDIO

Según Cardenas Castro y Huaman Condori (2022), indica que:

La minera Antapaccay es un proyecto presentado por Xstrata Tintaya S.A. y que más adelante fue adquirido por Glencore en mayo de 2013.

La producción en Tintaya empezó en 1985, cerrándose en junio del 2012 por agotamiento de mineral, actualmente se retomó la operación con las reservas mineras del proyecto Antapaccay.

La mina Antapaccay explota un yacimiento que incluye una mineralización de sulfuros y óxidos de cobre, así mismo este yacimiento es un acopio de cobre, lo conforman principalmente en rocas sedimentarias, las cuales contienen bornita, calcopirita, calcosina, covelita, pirita y óxidos de Cu y Fe.

Las reservas que tiene el proyecto ascienden a 720 millones de toneladas de cobre con una ley aproximada de 0.56%. La construcción del proyecto se puso en marcha entre el 2009 y 2012, la producción arranco desde el 2012 hasta la actualidad (Cardenas Castro y Huaman Condori, 2022).

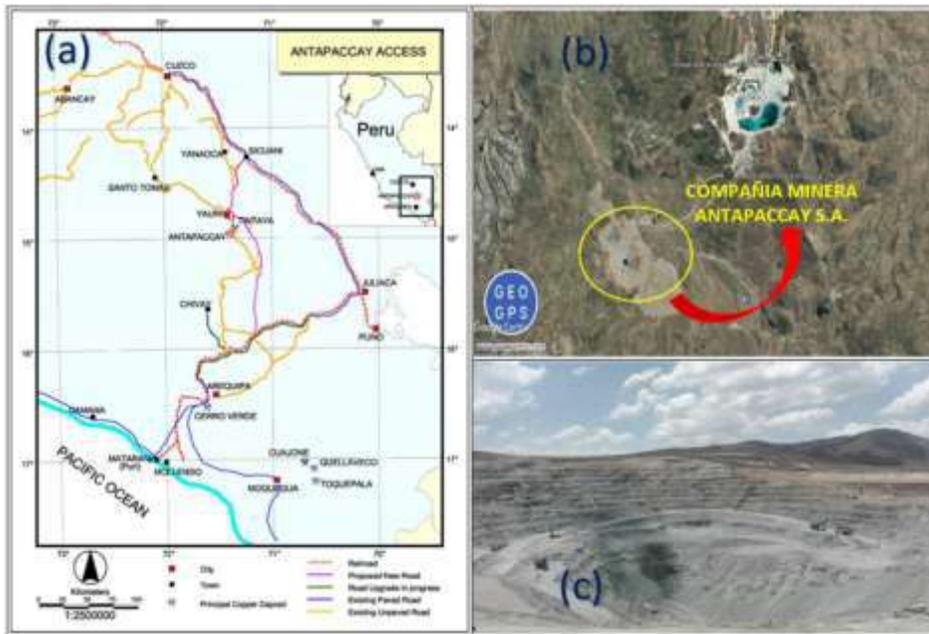
2.2. ÁMBITO GEOGRÁFICO

2.2.1. Ubicación

La Mina Antapaccay Políticamente, está ubicada en la Comunidad Campesina de Alto Huarca, Distrito de Yauri, Provincia de Espinar, Región Cusco, aproximadamente a 241 km al sureste de Cusco y 256 km al noreste de Arequipa. Geológicamente se ubica en el extremo sureste de Andahuaylas de la zona de Yauri, cuya diversidad metalogénica ha sido demostrada por el depósito tipo skarn de Tintaya (Cu-Au-Ag-Mo). El área minera es propiedad de Glencore, el área total del proyecto es de 9,393 hectáreas, y las coordenadas UTM del centro de la mina son Este: 243283.00, Norte: 8345572.00 a una altitud de 4,100 m.s.n.m. (Cardenas Castro y Huaman Condori, 2022).

Figura 1

(a) Vías de acceso a la mina Antapaccay, (b) Ubicación de la Mina Antapaccay, (c) Vista general de las excavaciones a tajo abierto



Nota. Tomado de Departamento de Geología de la Compañía Minera de Antapaccay.

2.2.2. Accesibilidad

Hay dos maneras de abordar a las instalaciones del proyecto desde la ciudad de Cusco y Arequipa, como se describe a continuación en la tabla 3.

Tabla 3

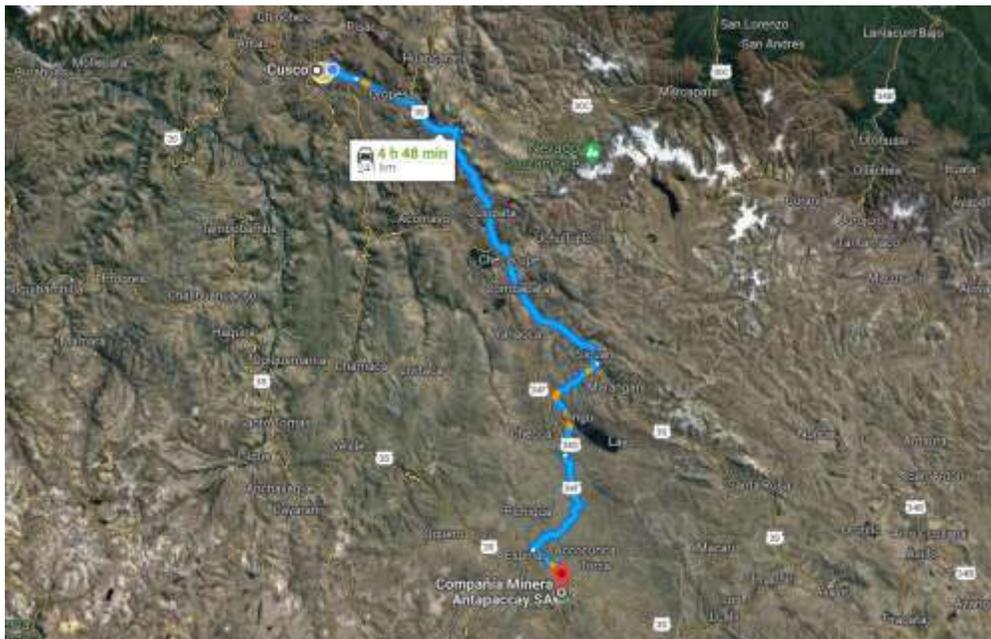
Vías de Acceso a la mina Antapaccay

Nº	Vías de acceso	Descripción	Kilómetros	Tiempo
1	Cusco – Antapaccay	Carretera Asfaltada	241.00 km	4h 50min.
2	Arequipa– Antapaccay	Carretera Asfaltada	256.00 km	3h 50min.
3	Vía aérea	Aterrizaje en un pequeño aeropuerto para avionetas, situado a 3 km al este de la provincia de Espinar.		

Nota. Elaboración propia.

Figura 2

Mapa de localización satelital



Nota. Tomado de Google Maps.

2.2.3. Reseña histórica

Según Cardenas Castro y Huaman Condori (2022), indica que:

Antapaccay es una empresa minera de cobre que forma parte del Grupo Glencore desde 2013. Inició sus operaciones en noviembre de 2012 luego de varios años de inversiones en investigación encaminadas a extender la vida útil de la mina Tintaya.

El asentamiento minero se encuentra ubicado a una altitud de 4100 metros sobre el nivel del mar en la provincia de Espinar en la región del Cusco. Esta actividad nos permite seguir impulsando el desarrollo sostenible de la provincia de Espinar, porque además de incentivar la creación de fuentes de trabajo directo e indirecto y mejorar la economía de la región mediante la compra de empresas locales, también invertimos en proyectos sociales. Dirigido a las comunidades de nuestra zona de influencia.

2.3. CLIMA, VEGETACIÓN Y FAUNA.

2.3.1. Clima

Según Cardenas Castro y Huaman Condori (2022), indica que:

El clima de la región es frío y seco, típico de los departamentos de puna que caracterizan al altiplano. Las precipitaciones en los ríos se regulan según la estación. Durante los meses de verano de diciembre a abril se observa un aumento continuo de las precipitaciones, lo que provoca problemas en la excavación de las zonas más profundas del pozo debido a zonas inundadas, así como problemas en la estabilidad del pozo. Pendientes en las zonas más altas del tajo, sectores de material morrénico y lecho de roca, y progresión de fallas locales.

Durante los meses de invierno caen fuertes heladas y el viento aumenta, las fluctuaciones de temperatura son claras durante el día cuando la temperatura es cálida de 19,6

°C y por la noche el clima frío es de -5 a -12,8 °C, la humedad relativa en junio es 49% en setiembre y 70% en los meses de enero a abril.

2.3.2. Vegetación

Según Cardenas Castro y Huaman Condori (2022), indica que:

Es variado debido a los humedales y las constantes lluvias de verano; las gramíneas dominan el mundo vegetal y sobreviven al invierno, pero las herbáceas y los helechos, cactáceas conviven durante la temporada de lluvias, cubriendo completamente las superficies cercanas a la mina con un manto verde, sin embargo, se trata de plantas de temporada que desaparecen en invierno y se vuelven verdes con la lluvia, como resultado de las actividades de construcción, hubo una disminución o pérdida de vegetación en el área. Las medidas de mitigación implementadas durante la construcción incluyen:

- Usar áreas previamente disturbadas en la medida de lo posible, utilizar áreas previamente perturbadas para reducir o prevenir la pérdida de vegetación en el área del Proyecto.
- Las áreas con una mayor incidencia de especies sensibles (especies de preocupación) fuera de los límites del proyecto, pero cerca del área de desarrollo están marcadas para que no sean perturbadas.
- En la medida de lo posible, trasladar las poblaciones de ciertas especies sensibles o protegidas a hábitats adecuados que no se verán alterados por las actividades del proyecto.
- Restringir las actividades humanas (pastoreo, agricultura, quema) en las áreas controladas por Glencore para promover el desarrollo de la vegetación natural.

Figura 3

La vegetación en la compañía minera Antapaccay



Nota. Elaboración propia.

2.3.3. Fauna.

Según Cardenas Castro y Huaman Condori (2022), indica que:

En la zona de Espinar Antapaccay se puede observar una gran cantidad y variedad de especies acuáticas. Kajachu y chirihue verde fueron las especies más comunes. En el área se registraron 03 especies de mamíferos pertenecientes a 03 géneros y 02 clases taxonómicas: Carnívora y Roedentia. Las especies registradas fueron roedores de la familia Muridae y otra de la familia Chinchillidae, la cual se registró mediante revisión de literatura y observaciones. Entre los reptiles y anfibios se registran: Sapo, Gastrotheca y Phrynopus, que viven en las zonas altas de los Andes a una altitud de 3,000 – 4,100 metros sobre el nivel del mar.

2.4. GEOLOGÍA

2.4.1. Geología Regional

Según Xstrata Tintaya S.A (2011), indica que:

La zona de estudio está en el flanco oriental de la Cordillera de los Andes, se ubica en la parte Sur del cuadrángulo de Yauri (Hoja 30-t de la Carta Geológica Nacional). Se encuentra en una región geológicamente activa, parte del Cinturón Circumpacífico. El terreno está compuesto por antiguas secuencias de areniscas y rocas de origen granítico y diorítico, las cuales, en contacto con rocas sedimentarias, han generado importantes depósitos de cobre.

Esta área es parte del Batolito Andahuaylas-Yauri, conocido por sus depósitos de pórfido cuprífero y skarn, minerales de gran valor económico. Además, la región ha dado lugar a otros yacimientos importantes, como Las Bambas, Constanza y Los Chancas, formados hace millones de años entre el Mesoceno y el Oligoceno.

2.4.1.1. Tectónica

Un estudio de los eventos tectónicos en el sur del Perú que dieron forma a las estructuras de la región de Andahuaylas-Yauri son como sigue.

Fines del Mesozoico.

Entre el Triásico y el Cretáceo Tardío, ocurrieron eventos tectónicos que formaron lo que se conoce como el Pre-Ciclo Andino. Estos movimientos afectaron grandes áreas y debilitaron la corteza terrestre, creando un ambiente favorable para la acumulación de sedimentos marinos. Además, se depositaron materiales volcánicos provenientes de un arco magmático ubicado al oeste. Hacia mediados del Jurásico, comenzó a formarse la cuenca de Arequipa, influenciada por fallas geológicas que se desplazaban en una dirección NWSE (Jordán G et al., 2014).

Ciclo Andino.

Está caracterizado por 3 fases principales: peruana, inca y quechua.

Fase Peruana.

Este es el evento tectónico de mayor intensidad (84-79 millones de años, Santoniano, Cretácico Tardío) Tardío 15-18 cm/año, que es alta debido a reconstrucciones paleo tectónicas. Estos estudios demostraron que la dirección de convergencia de las placas era de noreste a suroeste.

Fase Inca.

El cinturón Incaico se caracteriza por un sistema de perturbaciones transversales orientado noreste-suroeste o incluso este-oeste y noroeste-sureste con movimientos laterales y verticales de los Andes. En el sur del Perú, esta fase se caracteriza por pliegues apretados. Entre el área de Lircay y Ayacucho, los pliegues y fallas inversas tienen una tendencia de noroeste a sureste. La región suroeste del Alto Cusco - Puno se caracteriza por pliegues de longitud de onda larga orientados N-NW-S-SE, como en el sinclinal de Sicuani. Por ejemplo, los sistemas de fallas tienen una tendencia EW aproximada en la región de Abancay y son siniestros, como la falla Mollebamba N70W, que se puede rastrear a lo largo de más de 100 km. Al sur, en el sector Sicuani-Marangani, el echelón Alto Cusco-Puno, N70-80W, corta sistemas de fallas sinistralas.

Fase Quechua.

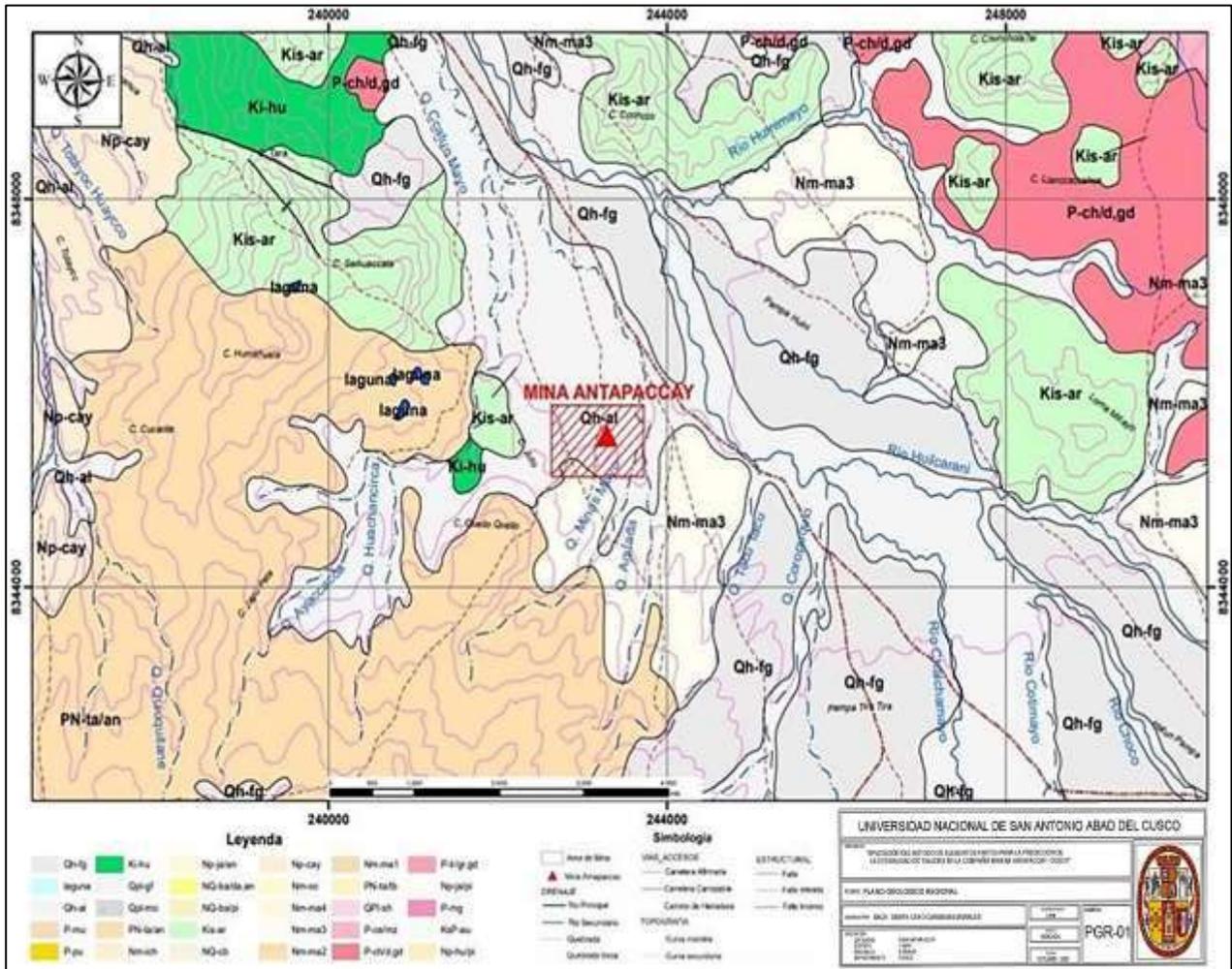
Según Serna (2009), indica que:

Se caracteriza principalmente por un cambio en la dirección de convergencia de EW a EW. La tasa de aproximación aumenta de 6 cm a 13 cm por año. Comienzan los pliegues y fallas, seguidos de un período de erosión conocido como la Superficie Roja. La Zona Andina fue la más

afectada, formándose una zona de pliegues y fallas inversas al este de la Zona de Deformación Inca. Durante estos movimientos de compresión, se formaron cuencas intramontañas de tipo graben entre el lado este del arco y el arco de Marañón. Este período tectónico fue seguido por un importante hundimiento en el lado oriental de la Cuenca Oriental en el este del Perú (Serna, 2009).

Figura 4

Plano Geológico Regional de la mina Antapaccay



Nota. Tomado de (Ccapa Cuti, 2019).

2.4.2. Geología local

Antapaccay corresponde a un depósito de pórfido de Cu bordeado por Ag y Au, con mineralización de cobre ampliamente extendida y vetas de monzonitas y dioritas; El contacto con

rocas sedimentarias calcáreas del Cretácico produjo cuerpos irregulares de skarn, horblenda y cuarcitas ricas en cobre, pero representan una pequeña proporción de los recursos totales.

Se separan en dos sectores:

1. Antapaccay Norte, 300m de largo y un ancho de 400m ligeramente extendido hacia el NW-SE.

2. Antapaccay Sur es el más grande, 1300 m de largo y un ancho variable de 250 a 430m extendido hacia el NO-SE.

2.4.2.1. Estratigrafía Local

Suelos Hidro mórficos (Q-t)

En la cuenca Yauri se encuentran principalmente en las quebradas altas y medias de los arroyos Quiscocampanilla, Campanilla, Ccellocca, Coroccohuayco. las cuales corresponden a depósitos fluviales de origen orgánico, constituidos por arenas, limos, arcillas blandos y saturados, no plásticos, de 1 a 5 m de espesor y ricos en restos radiculares.

Depósitos Aluviales (Q-al)

Este tipo de depósitos corresponden a materiales transportados y depositados por escorrentía. Contiene grava mal seleccionada con una matriz de puente de arena que varía en color de gris claro a gris oscuro a marrón, de suelta a compacta, de húmeda a saturada, con poca o ninguna plasticidad en áreas de mejor material. La proporción de material de grava suele ser del 60% - 65%, arena del 30% - 35% y material fino inferior al 5% del volumen total. Suelen formar terrazas de 1 a 20 metros de espesor en una o ambas orillas del río.

En la zona de Antapaccay - Tintaya los depósitos se muestran en ambas fronteras de los canales de los ríos Ocoruro y Salado.

Depósitos Coluviales (Q-co)

Una corta extensión formada por una mezcla de bloques, cantos rodados y gravas subaéreas angulares heterométricas, de naturaleza ígnea, sami - pelita y calcárea rodeadas por una matriz arenosa menor. Tiene bloques individuales que pueden tener hasta 3 metros de diámetro. En la zona de Antapaccay - Tintaya estos depósitos se presentan, por ejemplo, cerca de las quebradas Huaccollo y Coroccohuayco.

Depósitos Fluvioaluviales (Q-fl-al)

Estos materiales, transportados y depositados por el flujo de agua, están formados por gravas mezcladas con arena y limo, de tonos que van desde gris claro a oscuro y marrón. Pueden ser sueltos o compactos, y su nivel de humedad varía desde húmedos hasta completamente saturados. En las áreas donde hay más partículas finas, pueden presentar baja o nula plasticidad. Es común que formen terrazas a lo largo de una o ambas orillas de los ríos, alcanzando espesores de hasta 40 metros.

Depósitos Fluvioglaciares (Q-fg)

Estos depósitos se componen de limo arenoso y grava con arcilla y arena arcillosa con grava y algunos bloques; Consistencia compacta o densa y plasticidad media a baja. La proporción de material es piedra triturada de 50 - 60%, arena de 35 - 45% y material fino de 5 - 15%. El espesor de estos depósitos oscila entre 1 y 10 metros. Estos depósitos suelen estar cubiertos de tierra orgánica (turba). En la zona de Antapaccay - Tintaya se distribuyeron mayoritariamente en el fondo de los afluentes de los ríos Salado y Ocoruro, como Coroccohuayco, Quiscocampanilla,

Campanilla, Huaccollo, Surahuaico, etc. Otros depósitos existen en la margen izquierda del río Ocoruro.

Depósitos Morrénicos (Q-mo)

Estos depósitos tienen una morfología típica y forman montículos suaves y alargados que consisten en una mezcla de gravas y cantos rodados ígneos y sedimentarios de diferentes tamaños y características, incrustados en una matriz de limo arenosa poco estratificada de densa a muy densa con lechos sueltos. Durabilidad media a alta y parcialmente cementado. La proporción de material varía desde piedra triturada del 15% al 35%, arena del 25% al 50% y finos del 15% al 60%. El espesor de estos suelos oscila entre 2 y 20 metros.

En la zona de Antapaccay - Tintaya se presentan en cerros ubicados en la margen izquierda del arroyo Surahuaico, en la margen derecha de los arroyos Coroccohuayco y Huaccollo, y en el tramo alto del arroyo Huasacancha.

Formación Yauri (N-y)

Esta formación está constituida principalmente por arenas lacustres y penachos de lodo y conglomerados lenticulares fluviales, mezclados localmente con flujos de lahar, aluvial y huayco, de hasta 30 m de espesor. Las tobas son generalmente de color gris blanquecino y están laminadas en finas capas intercaladas con calizas de grano fino de color marrón rojizo y limolitas de color beige. En la zona de Antapaccay - Tintaya los afloramientos más importantes se ubican en las márgenes de los ríos Salado y Ocoruro. El contacto se produce en un ángulo opuesto a la Formación Casanuma de modo que se superpone a tobas o conglomerados.

Grupo Barroso

El grupo Barroso está representado por las formaciones Casanuma y Huaycha.

Formación Casanuma (N-ca)

Esta formación se compone principalmente de paisajes lacustres compuestos por lutitas arenosas y conglomerados lenticulares de río, mezclados localmente con flujos de lahar, inundación y huayco, depositados hasta 30 metros de profundidad alrededor del lago. Las tobas son generalmente de color gris blanquecino y están laminadas en finas capas intercaladas con calizas de grano fino de color marrón rojizo y limolitas de color beige. En la zona de Antapaccay - Tintaya los afloramientos más importantes se encuentran a lo largo de las riberas de los ríos Salado y Ocoruro. El contacto se produce en un ángulo opuesto a la Formación Casanuma de modo que se superpone a tobas o conglomerados.

Intrusivos Terciarios (Ti-int)

La unidad litológica más importante de la región, junto con las calizas de la formación Arcurquina - Ferrobamba. Consiste en depósitos de composición de diorita y monsdiorita con algunos umbrales de granodiorita. Las rocas de composición media suelen cortar rocas de composición básica, por lo que se encuentran monzonitas y granodioritas cortando tonalitas y dioritas. Las rocas varían en color desde gris verdoso a marrón rosado, leucocrático a mesocrático, porfirítico a fanerítico, y contienen abundantes cristales de 5 mm de plagioclasa, hornblenda y ferromagnesio.

Morfológicamente forma relieves ondulados y suaves a modo de colinas con picos aflorantes y poco suelo. Ocasionalmente se observan apariciones de composición andesítica y granodiorítica cortando el batolito, con una longitud promedio de 140° N y 60° NE.

En los lugares en contacto con rocas sedimentarias, la roca es microcristalina y de estructura afánica.

El metamorfismo dio lugar a recristalización, vetado, silicificación o sustitución metasomática, que, junto con la circulación de fluidos hidrotermales, dieron lugar a contactos normalmente en diferentes estados de alteración hidrotermal, según su proximidad o distancia del departamento de estudio.

La erosión del batolito varía de leve a severa y está asociada con áreas expuestas a rocas de concha y sitios de fracturas extremas. Los resultados petrográficos muestran que las rocas son de composición moderadamente alcalina (gabrodioritas a dioritas), abundante plagioclasa de sodio, anfíboles y piroxenos y trazas de cuarzo, mica y minerales magnéticos, alteración supergénica. La zona mineralizada de Coroccohuayco contiene pórfido de diorita a monsdiorita con un poco más de cuarzo.

Las relaciones estratigráficas en diferentes lugares indican que el batolito comenzó a formarse y emplazarse desde finales del Paleoceno hasta el Oligoceno. Los eventos de mineralización fechados en varias minas y proyectos en el área indican que estas vainas mineralizadas ocurrieron entre el Eoceno medio y el Oligoceno, hacia el final del emplazamiento del batolito. El emplazamiento de cuerpos de pórfido compuestos por monsonitas en rocas carbonatadas y silíceas recristalizadas y moderadamente fracturadas permitió la formación de depósitos mineros en el área con características similares a las del depósito de Coroccohuayco. En la zona de Antapaccay - Tintaya se presentan, en las partes altas y márgenes de los arroyos Coroccohuayco y Surahuaico y en las montañas de Yoraccasa y Ccarhuacha.

Formación Ferrobamba / Arcurquina (Km-fe)

Según Lytman et al. (1998), describe:

Formación calcárea con afloramientos muy extendidos. Consiste en capas de espesor medio de piedra caliza cristalina de color gris claro a gris oscuro intercaladas con vetas laterales, bajo contenido de carbono y pocos microfósiles con diversos grados de veteado por recristalización y/o metamorfismo. solubilidad superficial y estructuras kársticas por sector. Los análisis mineralógicos muestran predominio de calcita con trazas de plagioclasa y cuarzo, lo que puede indicar una alteración metasomática menor debido a su cercanía a los depósitos de Tintaya, Antapaccay y Corocchohuayco. Debido a sus propiedades de durabilidad, fractura e intemperie, la secuencia se considera estable, pero puede tener un riesgo moderado de daño en el plano debido a la orientación e inclinación de las capas, formación de fracturas tipo cuña al romperse. Por su posición estratigráfica, a esta formación se le asigna una edad Cretácico Superior. En la zona de Corocchohuayco se encuentran afloramientos de esta unidad en la cima de la Quebrada Quiscocampanilla, al lado izquierdo de la Quebrada Surahauico y en las montañas de Fito y Chapi (Lytman et al., 1998).

Formación Mara / Murco (Ki-ma)

Según Lytman et al. (1998), describe:

Una secuencia sedimentaria conformada por una sucesión delgada (50 m – 80 m) de arenisca arcósica, lutita y limolita de color rojizo a negro rica en material orgánico, bituminosa, friable, de friable a moderadamente resistente, moderadamente fracturada, con pirita común en las áreas de delgadas capas. moderadamente fuertemente plegado. En contacto con pulsos de magma

intrusivos, esta secuencia se silicifica y en algunos lugares metasomatiza hasta convertirse en hornblenda.

Su contacto es conforme con la Formación Hualhuani y ligeramente discordante con la Formación Arcurquina - Ferrobamba. No se han encontrado fósiles en la zona, pero por su posición estratigráfica se le ha asignado un periodo Cretácico Medio-Inferior (Lytman et al., 1998).

Formación Hualhuani/Soraya (Ki-hu)

Esa formación es la última etapa de sedimentación del Grupo Yura e indica una regresión a un nivel tidal desde niveles de plataforma (Formación Gramadal, no aflorante en la zona). La secuencia tiene una morfología de moderada a gruesa debido a la resistencia media a alta de los estratos que forman cerros altos en la zona. Litológicamente está formado por areniscas de cuarzo y cuarcitas alternadas, de color gris claro a blanco, de grano fino, medio y en estratos de espesor medio a grueso.

La secuencia estratigráfica muestra una clara tendencia sucesiones desde granos crecientes a granos decrecientes con pátinas de óxido de hierro en las fracturas y en la superficie. A nivel local y también por efecto hidrotermal, se observan series de brechas sedimentarias de origen autigénico (sin-sedimentos), que son resultado de la intrusión de dacita en el dique de monzonita.

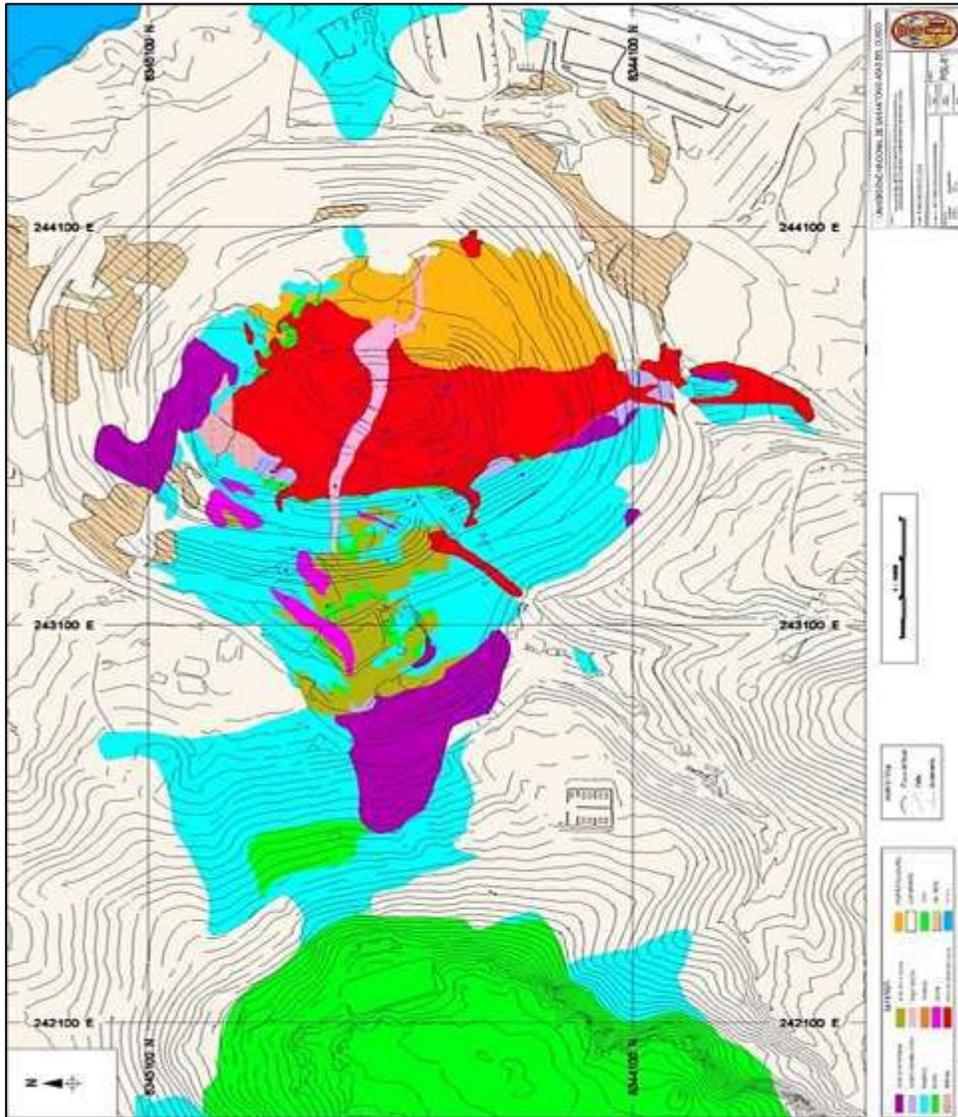
Debido a sus propiedades de durabilidad, fractura e intemperie, la secuencia generalmente se considera estable; Sin embargo, puede presentar riesgo de daño plano debido a la orientación y ángulo de pendiente de las capas hacia el este. También puede tener fallas en forma de cuña resultantes de la intersección del buzamiento y el fracturamiento.

Sus principales afloramientos se observan en las partes altas de las montañas Condorsayana, Ccarhuacha, Ccoyme, Supo y Ccatun Ccoime, y en la Quebrada Ccamac mayo, al

este de la cola de Tintaya. No se han encontrado fósiles en la zona, pero por su posición estratigráfica reconocida regionalmente, se considera que es de edad Cretácico Inferior. (Ccapa Cuti, 2019).

Figura 5

Plano Geológico Local de la mina Antapaccay



Nota: Tomado de (Ccapa Cuti, 2019).

2.4.3. Geología Estructural

Según Cerpa Cornejo y Meza Mendez (2001), afirma lo siguiente:

El marco estructural la Cuenca del Yauri está dominado por dos tendencias estructurales importantes que influyeron en su formación. Esta cuenca se formó durante el Mioceno como una cuenca sinorogénica, resultado de un sistema de compresión que se presentó de manera intermitente pero continua desde el Cretácico Superior.

La zona oriental de la cadena occidental de los Andes fue un máximo estructural durante el Triásico-Jurásico que separó la cuenca profunda del Yura (Arequipa) de la cuenca de Putina (Puno), llamado umbral Cusco - Puno o Altiplano (Audebaud et al.,1976; Carlotto, 1992,1998,2004; Jaillard & Sempéré, 1989; Perelló et al., 2003).

Esa elevación estructural fue erosionada y ahogada nuevamente durante el Cretácico,

Cuando las secuencias silíceas y pelíticas de las Formaciones Hualhuan y Murco y las secuencias calcáreas de la Formación Arcurquina - Ferrobamba se depositaron a niveles regionales, por lo que el medio ambiente, avanza hasta la plataforma carbonatada limitada al este. Las secuencias calcáreas sufrieron deformaciones post deposicionales debido al colapso de la plataforma marina, apareciendo en el área de estudio como bloques aislados con orientación local caótica pero espacialmente definidos (Callot y otros, 2008). Compresible Orogenia Inca Pliegues secuencias sedimentarias del Cretácico Inferior, formando extensos pliegues en secuencias siliciclásticas.

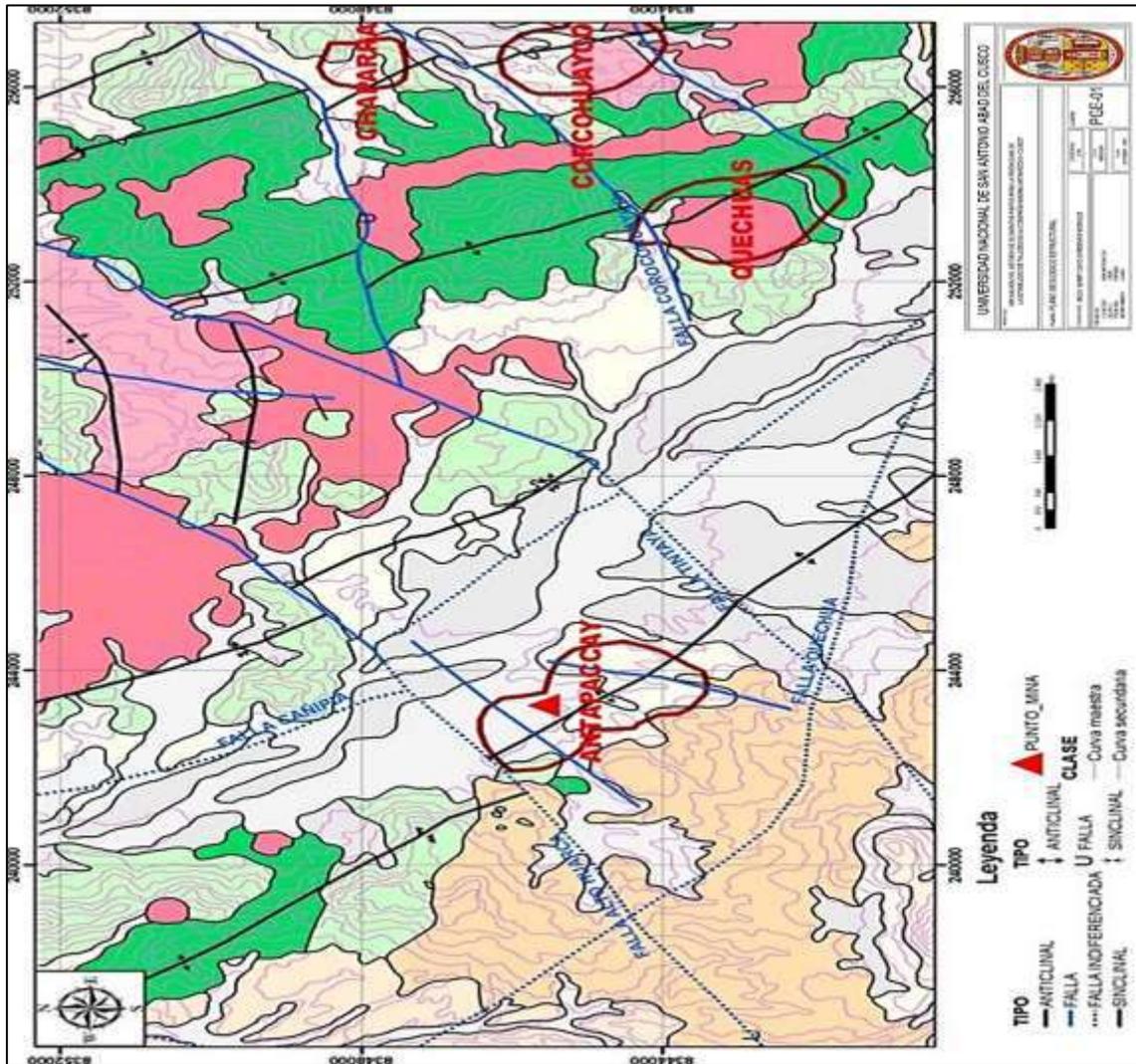
Durante la fase de compresión y levantamiento de la corteza terrestre, se activaron varias fallas de cabalgamiento y fallas normales de alto ángulo en la parte occidental de la cadena occidental (cinturón de Huanzo) en las direcciones noroeste-sureste, norte-sur y este. Las fallas

normales de alto ángulo del Eoceno-Oligoceno fueron muy activas a lo largo de las fallas y Condoroma - Caylloma y Cusco - Lagunillas - Mañazo; Permitieron que vainas de fuego mineralizadas (Batolito Andahuaylas – Yauri) penetraran en el área. Las clases vecinales más importantes de la zona son: Pomacanchis, Cusicamba, Santo Tomás, Tastani y Yauri. (Instituto Geológico Minero y Metalurgico INGEMMET, 1995).

El orógeno compresivo quechua del Mioceno elevó el área hasta 4.000 metros sobre el nivel del mar. Los eventos de compresión y tensión del Neógeno y Pleistoceno formaron una cuenca intracordillera (El Descanso - Cuenca Yauri) donde se formó un gran lago, donde se depositó la Formación Yauri toba y sistemas lacustres. No se han observado evidencias ni indicios de una falla activa en el área y un examen de las especificaciones técnicas no indica la presencia de fallas activas en el área.

Figura 6

Plano Geológico Estructural de la mina Antapaccay



Nota. Tomado de (Ccapa Cuti, 2019).

2.4.4. Geología Económica y Mineralización

La mineralización de cobre en el Proyecto Antapaccay ocurre principalmente en rocas intrusivas, extensiones, fracturas, vetas y brechas hidrotermales. Los minerales económicos son, por ejemplo, bornita, calcopirita y calcosina como principales sulfuros de cobre, que después de la oxidación forman algunos silicatos, carbonatos y otros minerales en la zona de oxidación. En contacto con rocas pre minerales como dioritas y rocas sedimentarias (calizas, limonitas y

areniscas), formando brechas de contacto, exoskarn y macizos mineralizados en el sedimento. Claro predominio de calcopirita en cuerpos de bornita alargados desde la superficie hasta la profundidad, la mineralización inicialmente parece fluir en dirección NO-SE; Gracias al control estructural de la fractura por descompresión intrusiva, "dispersamos" los cuerpos irregulares y discontinuos. Se identificaron dos cuerpos aparentemente aislados, de los cuales el del sur es el más grande a una altura de 1300 metros. Al noroeste y con un ancho variable de 250 - 430 m y con el cuerpo inferior por el norte con 300 metros al noroeste – sureste con un ancho de 400 m.

La separación de las zonas mineralizadas está determinada principalmente por la prevalencia de los minerales que se encuentran en ellas y el índice Ratox, que se define como la relación entre los valores de cobre oxidado y el cobre total.

2.4.4.1. Zona Lixiviada

La zona de lixiviación en los depósitos se debe principalmente a la reacción del ácido sulfúrico de baja concentración producido por la reacción del agua de meteorito con pirita. Sin embargo, debido a la baja ocurrencia de pirita en Antapaccay, esta ocurrencia fue reinterpretada y definida como áreas de riesgo metalúrgico, especialmente en áreas de presenta falla y drenaje subterráneo.

2.4.4.2. Zona de Óxidos

Con la comparecencia de calcopirita y la pirita están presentes en cantidades muy pequeñas, esta última creó un ambiente oxidante que se profundiza desde unos pocos metros hasta 20 metros o más, dependiendo del comportamiento estructural de los flujos de agua subterránea, donde se profundiza un poco más.

Los minerales económicos incluyen crisocola, en menor medida malaquita o azurita, tenorita y algunos cobres negros insolubles y estos se incluyen entre los minerales.

2.4.4.3. Zona de Pórfido Mixto

A esta área la llamamos minerales de zona de oxidación, minerales de zona de enriquecimiento y minerales de sulfuro de oxidación primaria.

La mineralogía de los minerales de enriquecimiento incluye tenorita, cuprita, calcosita y cobre nativo. Identificar estos minerales y su ubicación es importante para definir unidades geometamórficas.

Determinar los tipos de análisis químicos es muy importante y actualmente se está reconstruyendo para enviar nuevas pruebas de cobre nativo, cobre secuenciado y otros que nos ayudarán a identificar bien estas concentraciones.

2.4.4.4. Zona de Pórfido Sulfuro

La zona de mineralización hipógena o primaria se denominó zona de sulfuro de pórfido. Esta constituye la mineralogía dominante del proyecto. La mineralogía se compone principalmente de calcopirita y bornita, con muy poca pirita. La mineralización primaria ocurre principalmente en micro venillas y diseminadas. Se presenta una brecha mineralizada tipo Stockwork donde la mineralización ocurre en una veta intensa de Qz.

2.5. MINERÍA

2.5.1. Capacidad de Producción de la Empresa Minera Antapaccay

La mina Antapaccay es una mina a cielo abierto (que consta de un tajo norte y un tajo sur) con operaciones de camiones y palas que proporcionan una capacidad total anual de manejo de materiales de aproximadamente 165 millones de toneladas. El equipo principal incluye una flota

de camiones de 360 toneladas métricas, palas de cable de 123 metros cúbicos y 40 metros cúbicos, topadoras y cargadoras, así como equipo de soporte. El mineral se extrae y se envía a la trituradora primaria ubicada en la mina y para después transportar el mineral triturado a una pila de almacenamiento de mineral grueso mediante una faja transportadora overland de aproximadamente 6.8 kilómetros. Los alimentadores en el acopio de mineral grueso transportan el mineral triturado a la planta de Antapaccay para su procesamiento. 7

Figura 7

Transporte del material triturado con faja transportadora overland



Nota. Elaboración propia.

2.6. OPERACIÓN UNITARIA

2.6.1. Perforación

En el proyecto Antapaccay el tipo de perforación es la diamantina, el cual se realiza con el uso de la maquinaria Perforadora 39 y 49 HR BUCYRUS. Adicionalmente, los parámetros de la

información topográfica y de geología del planeamiento se usan para el diseño de la perforación con el empleo de rutinas del MEDSystem acompañado de la aplicación del sistema de GPS del Dispatch en las perforadoras. Para tener finalmente la salida con resultados estimados de granulometría, esponjamiento y rendimiento de un disparo.

Según Calsina Otoronco (2022), afirma que:

Los parámetros de perforación primaria son:

- Diámetro de taladro: 12 ¼”.
- Profundidad de taladro: 15 - 16.5 metros.
- Sobre perforación: 1.5 metros.
- Malla de perforación Rectangulares: 8.0 x 8.5, 8.5 x 8.5 y 9.0 x 10.0.
- Velocidad de penetración: 55 – 62 metros/hora.

Entre los equipos de perforación que se usan se tiene de acuerdo a la siguiente información detallada en la tabla 4.

Tabla 4

Equipos de perforación de la mina Antapaccay

Tipo	Fabricante	Modelo	Nº Unidades	Diámetro
Primaria	Caterpillar	MD 6540	1	12 1/4"
Primaria	Caterpillar	MD 6640	1	12 1/4"
Primaria	Bucyrus	39 HR	1	12 1/4"
Primaria	Bucyrus	49 HR	1	12 1/4"
Primaria	P&H	320XPC	1	12 1/4"
Secundaria	Sandvik	DR560	2	5"

Nota. Tomado de (Calsina Otoronco, 2022, p. 57).

Figura 8

Proceso de Perforación con equipo 39 HR BUCYRUS



Nota. Elaboración propia.

Figura 9

Proceso de perforación con equipo 49 HR BUCYRUS



Nota. Elaboración propia.

2.6.2. Voladura

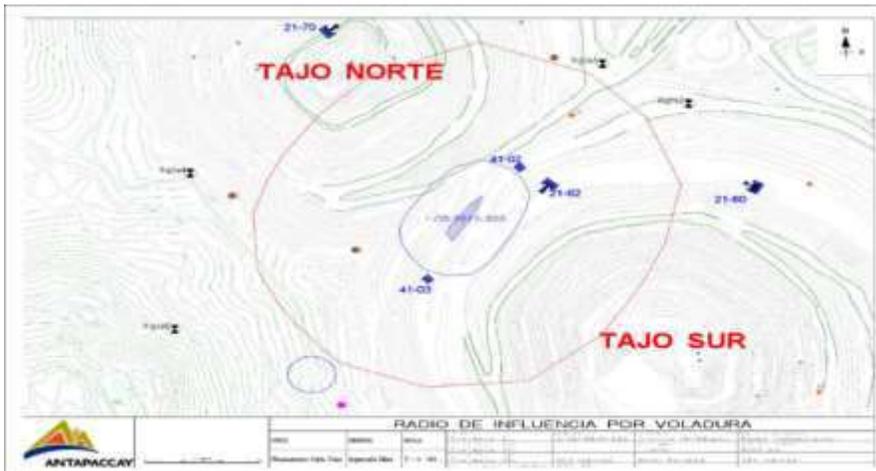
En caso de la voladura el objetivo es de enviar de forma sostenida 130,000 toneladas húmedas de mineral con destino a la chancadora primaria (CHP), en Antapaccay se tuvo en consideración el incremento del factor de potencia para lograr más de 50 % de finos. El material triturado debe ajustarse a la granularidad y disposición adecuada para los procesos de carga y transporte. Actualmente esta actividad está subcontratada a la empresa Orica Mining Services.

Los accesorios de voladura utilizados en la operación son los siguientes:

- Nitrato de Amonio.
- Petróleo Diésel N° 2.
- Emulsión Matriz.
- Booster de pentolita EXAPRIME 1 lb.
- Cordón detonante NP 05 x 750 Britanite.
- Detonador no electrónico EXANEL 400, 500, 600, 700 y 800 milisegundo.
- Conectores y retardos superficiales EXANEL.
- Línea silenciosa 500 metros.

Figura 10

Radio de influencia por la voladura



Nota. Elaboración propia.

2.6.3. Carguío

La carga del material producto de la voladura se desarrolla con el uso de palas gigantes eléctricos o frontales que posteriormente llenan el material en camiones pesados realizando así una operación continuada. En este proceso una pala requiere un frente de carguío de por lo menos 65 metros de ancho y realizando así la carga de camiones los cuales se colocan de manera alternativa en 2 carriles quedando así a cada lado de la pala.

Los cargadores pueden colocar el material fragmentado directamente de una ubicación específica los equipos utilizados de carguío que operan en la mina Antapaccay son:

Tabla 5

Equipos de Carguío que operan en la mina Antapaccay

Tipo	Fabricante	Modelo	Nº Unidades	Capacidad TM/H
Pala Eléctrica	Caterpillar	7495 HD	4	123
Pala Eléctrica	P&H	4100 XPC	1	123
Pala Eléctrica	P&H	2800 XPB	2	77
Pala Hidráulica	Caterpillar	6060 FS	1	75
Cargador Frontal	Caterpillar	994 F	1	40
Cargador Frontal	Caterpillar	994 K	1	40

Nota. Tomado de (Calsina Otoronco, 2022, p. 57).

Figura 11

Carguío con equipo Pala Eléctrica CAT 7495 HD



Nota. Elaboración propia.

2.6.4. Acarreo

El traslado del material fragmentado en la mina se denomina acarreo o transporte, debido a que tiene limitaciones y muchas veces se tiene un determinado radio de acción en los frentes de operación.

El traslado del material mineralizado se realiza con el uso de camiones de gran tonelaje que oscilan entre 360 a 225 toneladas, en los cuales se transporta el material partiendo del tajo de carguío con dirección a diferentes frentes, en el caso del mineral con ley se dirige a la chancadora primaria, asimismo el material estéril con destino a botaderos y el mineral de baja ley a botaderos especiales conocidos como Stock Piles.

Tabla 6

Equipos de Acarreo que Operan en Mina Antapaccay

Fabricante	Modelo	N° Unidades	Capacidad TM/H
Caterpillar	793D	8	225
Caterpillar	797F	25	360
Komatsu	930E-4	9	290
Komatsu	980E-5	27	360

Nota. Tomado de Compañía Minera Antapaccay.

Figura 12

Transporte y Acarreo del material fragmentado con camiones



Nota. Elaboración propia.

Figura 13

Acarreo del material fragmentado con CAT 793D



Nota. Elaboración propia.

2.7. PLANTA METALURGICA

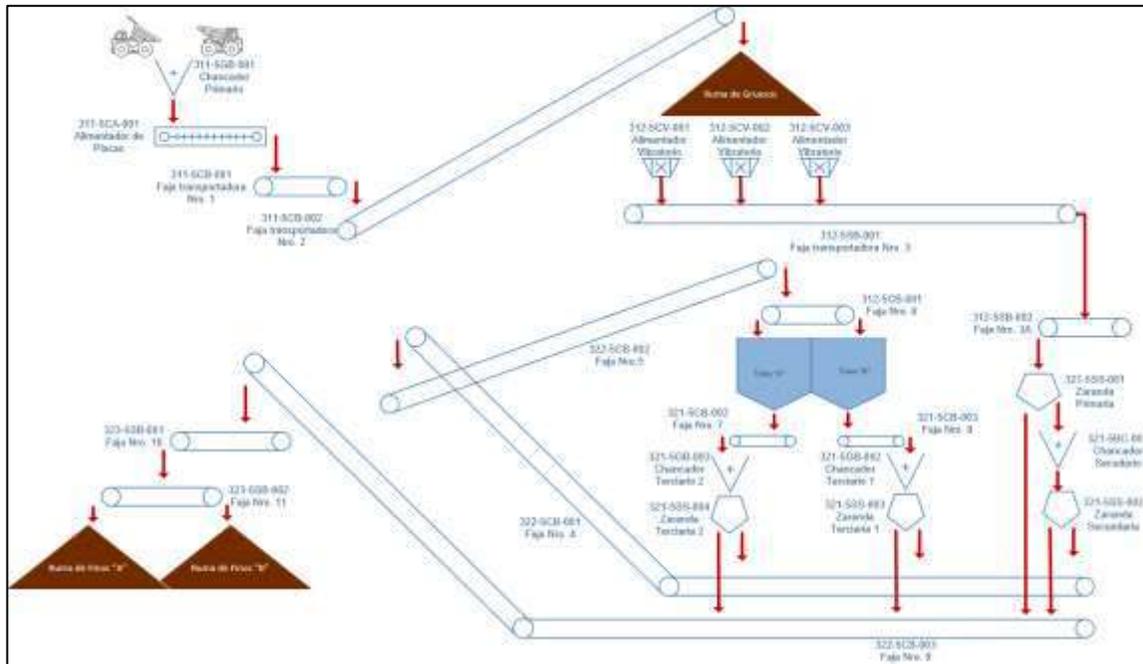
2.7.1. Proceso de Concentradora Antapaccay

2.7.1.1. Chancado

La planta concentradora de Antapaccay está diseñado para tratar 70,000.00 Ton/día de mineral el cual es transportado desde la mina hasta la planta de trituración primaria mediante camiones, a fin de producir el concentrado de cobre comercial es así que el mineral ROM es alimentado a la chancadora giratoria la cual reduce el mineral stock hasta tener un tamaño menor a 7 pulgadas, continuando con la descarga del mineral triturado por medio de alimentador con dirección a la faja de sacrificio que a su vez descarga sobre la faja overland, finalmente el mineral es embarcado a la pila de almacenamiento de mineral grueso que tiene una capacidad de 55,000.000 Ton/día, siendo extraído el mineral de la pila con 4 alimentadores de placas hacia la faja de alimentación al molino donde se agregan bolas de spulg y la carga circulante compuesta por los pebbles chancados.

Figura 14

Diagrama del proceso de chancado



Nota. Tomado de Compañía Minera Antapaccay.

Figura 15

Chancadora primaria giratoria



Nota. Elaboración propia.

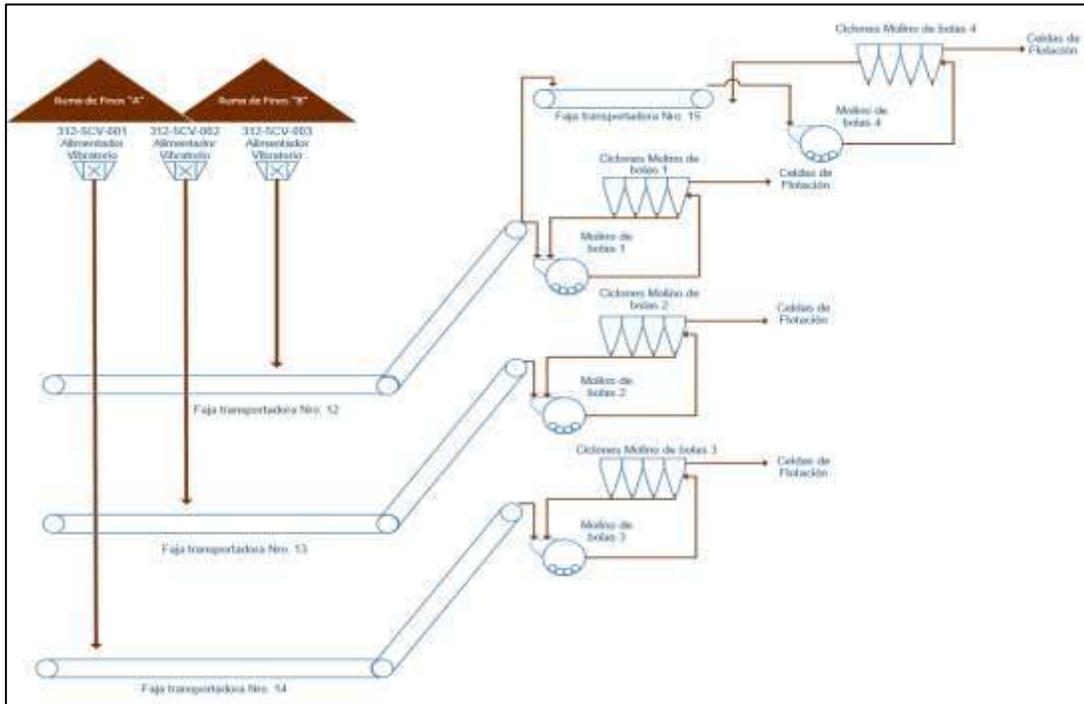
2.7.1.2. Molienda

En la mina Antapaccay se viene operando con tres molinos en paralelo en circuito cerrado, con el siguiente detalle: (02) molinos de bolas de la misma proporción de 16' x 20' de 3000HP, los mismos que son operados en circuito cerrado teniendo en cada caso un nido de 4 ciclones y uso de bombas de 560 HP con velocidad variable. La molienda primaria se da en un molino que cuenta con un Tromel corto para la clasificación del producto molido, una zaranda vibratoria se encarga de clasificar el mineral molido en 2 fracciones, el sobre tamaño o la partícula reducido es enviado al proceso de chancado pebbles mientras que el bajo tamaño Rougher se alimenta de la molienda secundaria a bajo tamaño del Tromel del molino, centrifuga y alimenta la pulpa de los nidos de hidrociclones en el cual se realiza la descarga Rougher Float y es alimentada a los molinos de bola, de modo que es enviado hacia el proceso de flotación y remolienda teniendo una granulometría de 207 um (micras) y un 33% de sólido.

El sobre tamaño de la zaranda vibratoria se descarga en una serie de fajas las cuales transportan los pebbles con dirección a la pila de almacenamiento, posteriormente son extraídos a través de 2 fajas que paralelamente alimentan a 2 chancadoras Pebbles a razón de conseguir de esta manera un tamaño de partículas < 14mm, las cuales se carga nuevamente sobre la faja de alimentación cerrando así el circuito.

Figura 16

Diagrama de flujo del proceso de molienda planta



Nota. Tomado de Compañía Minera Antapaccay.

Figura 17

Molienda SAG



Nota. Elaboración propia.

2.7.1.3. Flotación.

La flotación de pieza es desarrollada en 5 etapas, iniciando con el concentrado que se produce de la celda columna y que es enviado al proceso de espesamiento de concentrado del mismo modo que el relave final de este proceso de flotación es cambiado al proceso de espesamiento de relaves.

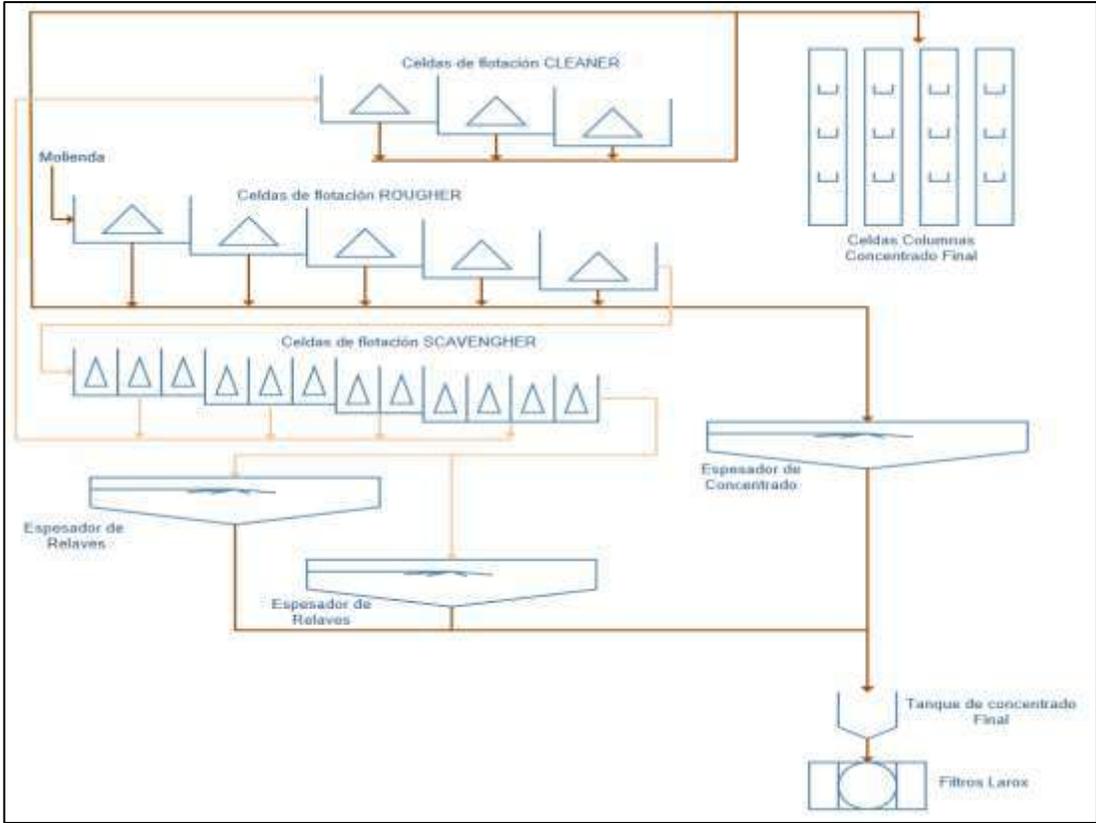
En las etapas de flotación Rougher y Scavenger se encuentran instalados en 2 filas de 8 celdas por cada fila, las 2 primeras celdas de cada fila pertenecen a la flotación Rougher y los 6 restantes a la flotación Scavenger, siendo los concentrados de alta y baja ley respectivamente, los mismos que son colectados de manera independiente, enviándose así a remolienda el producto de la remolienda con P80 de 65 a 45 um (micras), es alimentado a la etapa de limpieza.

El concentrado de cobre con 38% de sólidos es espesado hasta un 65% de sólidos que después serán enviados a la planta de filtrado el agua recuperada Over Float con valores <15 unidad nefelométrica de turbidez “NTU” de turbidez es recirculada a la planta concentradora, de esa manera en la planta de filtrado se reduce la humedad de concentrado por medio del filtro, presa de 9% el concentrado es enviado mediante fajas transportadoras hacia el proceso de despacho de concentrado de cobre es extraído por medio de un cargador frontal el cual carga en camiones para su posterior transporte al puerto de Matarani.

Buscando asegurar la liberación correcta desarrollada en el circuito del cual posee la instalación de un molino vertical de 200 HP destinado a tratar las colas de las celdas columna.

Figura 18

Diagrama de flujo del proceso de flotación planta Tintaya



Nota. Tomado de Compañía Minera Antapaccay.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Antecedentes a nivel internacional

En el ámbito internacional se tiene amplia literatura con respecto al desarrollo de métodos para determinar (o predecir) la estabilidad de taludes, como se mencionará a continuación:

En la investigación realizada por (Hazari et al., 2020), el artículo científico lleva por título: “Método del círculo sueco para el análisis pseudodinámico de taludes teniendo en cuenta el mecanismo de falla circular”, de la institución Ingeniería Geotécnica y Geológica Springer Nature Suiza AG 2020; la investigación consistió en el desarrollo del método del círculo sueco para el análisis pseudodinámico de taludes teniendo en cuenta el mecanismo de falla circular, enfocándose en determinar la estabilidad de la pendiente de tierra del suelo bajo condiciones de carga sísmica. El análisis presentado adopta un enfoque pseudodinámico de equilibrio límite, que considera el efecto de la diferencia de fase tanto en las ondas de corte como en las ondas primarias que viajan a través del medio del suelo durante la vibración del terremoto. El umbral de aceleración y desplazamiento de las pendientes del suelo se calculó a través del método pseudodinámico. Para la obtención de la solución numérica bidimensional se utilizó el software de elementos finitos PLAXIS 8.2. en este análisis de elementos finitos, los materiales del talud se modelan utilizando

el criterio de falla elastoplástica de Mohr Coulomb. Mediante este análisis se estudian los efectos de una amplia gama de variaciones de los parámetros del suelo, como por ejemplo la aceleración sísmica horizontal y vertical, el factor de estabilidad, el ángulo de pendiente, el ángulo de fricción interna. Las conclusiones, con relación al análisis de resultados muestran que el factor de seguridad disminuye al presentarse aumento en la aceleración sísmica horizontal y vertical, además que la variación por aceleración sísmica es no lineal, también se observó que el incremento de la relación aceleración vertical/aceleración horizontal reduce el factor de seguridad frente a la estabilidad de taludes. También fue comprobado que el factor de seguridad aumenta mediante el incremento del ángulo de fricción del suelo y disminuye con el incremento del ángulo de pendiente.

En el proyecto de investigación de Sengupta & Giri (2011), que lleva por título: “Análisis dinámico de taludes con apoyo en suelo”, del Instituto Indio de Tecnología Kharagpur, Kharagpur, India y Para la Maharaja Engineering College, Orissa, India; menciona que el enfoque del límite cinemático para analizar la estabilidad de taludes viene a ser un método analítico y es aquí donde se consideraron los efectos de los movimientos sísmicos de manera aproximada en términos de fuerzas horizontales dependientes del coeficiente sísmico. En este caso se consideraron dos tipos de superficies de falla en el presente estudio, siendo así una superficie de falla plana y otra de falla circular. El método propuesto puede verse como una extensión del método de las rebanadas, pero brinda un tratamiento más preciso de las fuerzas porque se presentan en forma integral. Se encontró que el factor de seguridad y las fuerzas obtenidos por el método propuesto concordaban bien con los resultados publicados para un muro vertical de 8 m de altura. En cuanto a las conclusiones, se encontró que las predicciones realizadas con el método en relación de la fuerza axial máxima y el factor de seguridad concuerdan con los resultados correspondientes publicados para corte vertical al ras del suelo de 8 m de altura bajo condiciones sísmicas.

En el proyecto de investigación de Dyson & Tolooiyan (2019), titulada: “Predicción y clasificación para análisis de estabilidad de taludes de elementos finitos mediante comparación de campos aleatorios”, del Grupo de Investigación de Ingeniería Geotécnica e Hidrogeológica (GHERG), Universidad de la Federación de Australia, Churchill, VIC 3842, Australia; la investigación consistió en el desarrollo de la predicción y clasificación para análisis de estabilidad de taludes de elementos finitos mediante la comparación de campos aleatorios. La presente investigación considera el análisis probabilístico de estabilidad de taludes con el uso el método de elementos finitos aleatorios (RFEM) para determinar el nivel de similitud entre campos aleatorios. Dicho procedimiento es introducido con el objetivo de predecir el factor de seguridad (FS) de instancias de campos aleatorios individuales del método de Monte Carlo (MCM) antes de la simulación de elementos finitos, en función de las medidas de similitud de campos aleatorios. Estudios previos de análisis probabilístico de estabilidad de taludes han requerido numerosas instancias de MCM para alcanzar la convergencia de FS.

3.1.2. Antecedentes a nivel nacional

En el proyecto de tesis de Huamani & Newton (2018), titulada: “Estandarización de la distancia de descarga de camiones mineros en botaderos de desmonte mina, mediante análisis de estabilidad de Taludes Unidad Minera Constancia”, de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa; la investigación se desarrolló con el fin de mejorar las prácticas de descarga en los botaderos para garantizar la seguridad de la operación. Se consideró la actual condición de vertido de material de desmonte en el botadero de mina como: tipo de camión, tipos de material de fundación, tipos de desmonte y presencia de agua. Para lograr este objetivo primeramente se describe las actividades realizadas para la obtención de parámetros geotécnicos de resistencia de los materiales ubicados en la zona de estudio y a partir de ello se ha realizado una serie de análisis

de estabilidad con el software Slide del paquete Rocscience y se obtuvo la distancia de descarga segura para cada escenario simulado, cuyo factor de seguridad satisface los criterios de aceptabilidad establecidos.

En la investigación de Gomez Tique (2019), que lleva por título: “Aplicación de modelo predictivo de daño (CROSS HOLE) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud, mina Constancia – 2019”, de la Universidad Nacional de Moquegua; para optar el grado de Ingeniero de Minas, cuyo objetivo principal es la estabilidad del talud del banco al momento de realizar voladuras para la obtención del mineral, para ello tenemos que determinar la Vibración Pico Partícula Máxima (VPP máxima) producida. El cálculo Vibración Pico (VP) promedio realizado mostro que es de 1,820 m/s correspondiente a los parámetros geotécnicos entregados en la Fase 02 Monzonita Porfirítica (MP1) potásica, con este cálculo y con lo que se definió en la Ecuación del VPP máxima, han podido ser estimados los valores de estos. El estudio de Cross Hole permite obtener el modelamiento de vibraciones con representación gráfica del modelo H&P, con parámetros de $K=393.13$ y $\text{Alpha}=1.0986$ a un nivel de confianza del 93%, el cual es requerido para el software especializado, para obtener las simulaciones. En conclusión, el daño al talud por la voladura no solo considera el efecto del campo cercano, sino que influye también el que se presenta por campo lejano. Por lo que la medida de control también ha de depender de los tiempos de retardo designados; definir dichos retardos críticos puede ayudar a recudir el impacto negativo hacia las paredes sin afectar la distribución granulométrica requerida por los procesos posteriores.

3.1.3. Antecedentes a nivel local

Localmente, en la tesis de Mendoza Loayza (2016), titulada: Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay, de la Pontificia Universidad Católica del

Perú; para optar el grado de Ingeniero de Minas, tuvo como objetivo de determinar los parámetros de diseño de los taludes que se construirán en suelos. Estos taludes son considerados de gran altura debido a que la profundidad efectiva de excavación o desnivel supera los 100 metros. Para ello, se realizaron los análisis de estabilidad en condiciones estáticas y pseudoestáticas considerando valores variables de (Ru) para los suelos debido al desconocimiento de la ubicación exacta de la línea piezométrica. Los análisis fueron ejecutados para la tercera fase del plan de minado. Para ello las secciones fueron obtenidas por medio de software Minesight, las cuales se exportaron al AutoCAD para después ingresarlas al software Slide v6.0. En este último se realizaron todos los análisis de estabilidad empleando el método de equilibrio límite. Los parámetros geotécnicos de estratos de los suelos presentes en las secciones fueron obtenidos a partir de los resultados de los ensayos de densidad y corte directo. A partir de los resultados de los análisis, se definieron los parámetros más óptimos de diseño de taludes con el fin de reducir los riesgos de deslizamientos.

3.2. BASES TEORICAS

3.2.1. Método de Elementos finitos

Es una herramienta que proporciona muchas posibilidades para la evaluación de estabilidad de taludes.

Es así que el método de elementos finitos sirve para obtener el estado tensional de la totalidad de la masa de suelo, en el procedimiento de la aplicación de la carga, donde las tensiones normales y de corte son computadas en relación a una superficie de falla seleccionada, a través de un procedimiento para combinar un análisis de tensiones por elementos finitos en un talud con los conceptos del método de análisis por equilibrio límite, logrando un factor de seguridad general que expresa la estabilidad del talud fundamentada en las tensiones calculadas en la masa de suelo.

Para el caso de las tensiones calculadas por elementos finitos, vienen a ser usadas para calcular las tensiones, ya sea normal y/o de corte en la superficie de falla. Las tensiones efectivas del paso de carga analizado son tomadas para calcular los factores de seguridad locales en el centro de la base de cada faja, así como el factor de seguridad general de toda la superficie de deslizamiento.

En el caso del factor de seguridad general se viene a definir en correlación el método de elementos finitos para estabilidad de taludes descrito por (Kulhawy, 1969), y se refleja como la relación entre la suma de la resistencia incremental de la fuerza cortante, S_r , y la suma de la fuerza movilizadora al corte, S_m , a lo largo de la superficie de falla:

$$F_{fem} = \frac{\sum S_r}{\sum S_m}$$

Donde: S_r : es la fuerza resistente sobre cada porción de superficie de deslizamiento propuesta y S_m : fuerza movilizadora. La fuerza resistente por cada una de las fajas, se calcula en términos del esfuerzo de corte resistente τ en el centro de la faja, multiplicada por la longitud de la misma, dv , la cual puede ser escrita para suelos saturados y no saturados como:

$$S_r = \tau dv = (c + \sigma' \tan \varphi) dv$$

Siendo σ' la tensión efectiva normal a la dirección de la porción dv de superficie de deslizamiento, c la cohesión y φ el ángulo de fricción interna del suelo.

La fuerza movilizadora de cada faja puede obtenerse a partir de la siguiente ecuación:

$$S_m = \tau' dv$$

Donde τ' es la tensión efectiva tangencial a la dirección de la porción dv , actuando en el centro de la misma.

El factor de seguridad local es determinado como la relación de la fuerza resistente al corte, S_r , en un punto a lo largo de la superficie de falla dividido por la fuerza al corte movilizador, S_m , en el mismo punto (Fredlund & Scoular, 1999).

$$F_{local} = \frac{S_r}{S_m}$$

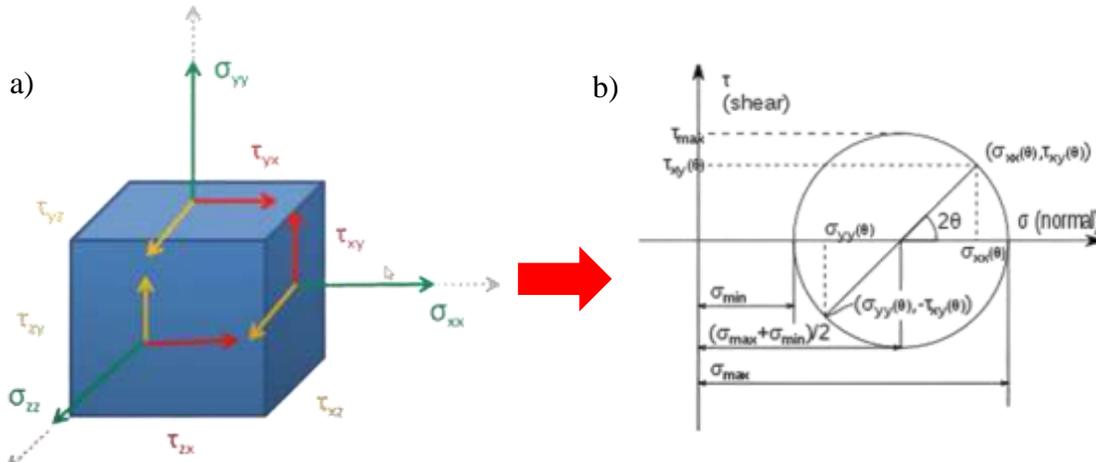
La fuerza al corte resistente, S_r , y la fuerza movilizadora de corte, S_m , son calculadas usando las tensiones calculadas por medio del análisis con el uso del método de los elementos finitos.

3.2.2. Criterio de Falla de Mohr Coulomb

La resistencia cortante de una masa de suelo es la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir esfuerzos deslizantes a lo largo de cualquier plano.

Figura 19

a) Caras vistas en un estado tensional b) la resistencia interna del material a la falla

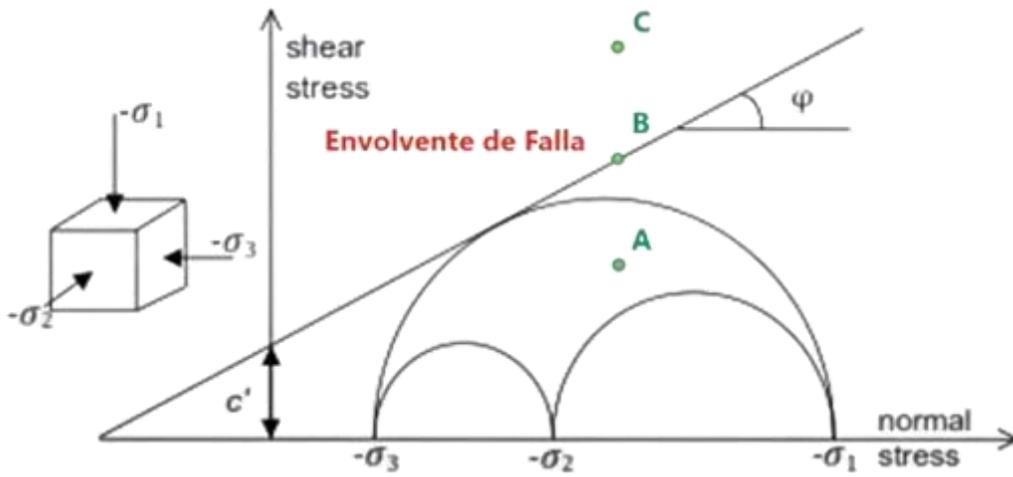


Nota. Tomado de (Orihuela Roman, 2006).

Mohr (1990), estableció que la falla de un material se ocasiona producto de una combinación crítica de esfuerzo normal y cortante y no solo por la presencia de alguno de ellos.

Figura 20

Descripción de la envolvente de falla de Mohr-Coulomb



Nota. Tomado de Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2018, Vol.12.

Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau_f = f(\sigma)$$

Sin embargo, para la mayoría de problemas en mecánica de suelos, Coulomb (1776), presenta la relación:

$$\tau_f = c + \sigma * \tan(\phi)$$

En un suelo saturado, el esfuerzo normal total en un punto, es la suma del esfuerzo efectivo y la presión de poros:

$$\sigma = \sigma' + u$$

El esfuerzo efectivo es tomado por los sólidos del suelo, entonces, para aplicar esta relación a la mecánica de suelos reemplazados en esfuerzo total en la envolvente lineal de Mohr – coulomb:

$$\tau_f = c + (\sigma - u) * \tan(\phi) = c + \sigma' * \tan(\phi)$$

El alcance de esta ecuación es muy amplio, ya que puede explicar muy fácilmente fenómenos como la licuefacción estática.

3.2.3. Modelo Drucker-Prager

El modelo Drucker-Prager modifica la función de fluencia Mohr-Coulomb para evitar singularidades asociadas a las esquinas. A diferencia del modelo de Mohr-Coulomb, el modelo de superficie de fluencia Drucker-Prager analiza y se representa un cono cilíndrico en el espacio de tensión principal. Similar al modelo MC, el modelo DP de superficie de fluencia depende de la tensión media efectiva σ_m . La versión actual del modelo DP implementada en GO5 MEF se basa en el supuesto de extensión triaxial.

3.2.4. Diseño de Bancos

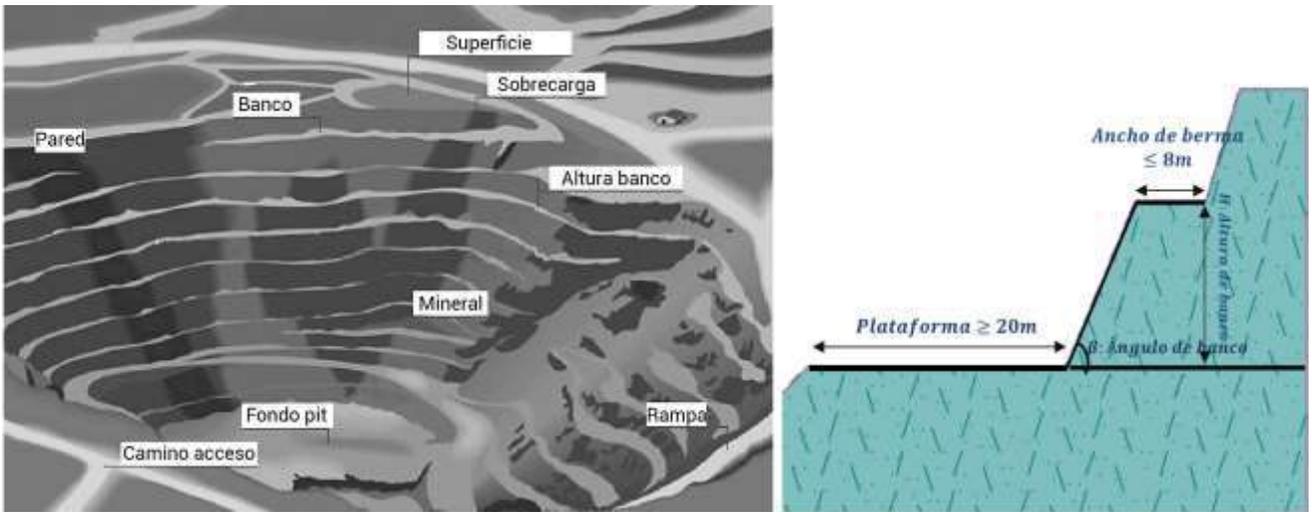
Las condiciones geomorfológicas de la ubicación del yacimiento y su acceso con dirección a la zona de explotación y las características de sobrecarga que puedan soportar los bancos, hacen que el sistema óptimo de extracción de la materia prima, sea a través de las excavaciones a tajo abierto, esto se concreta con el uso del método convencional de explotación por bancos descendentes, hasta alcanzar la profundidad deseada.

El número de bancos necesarios está en función de la profundidad del depósito, el cual está dada por la siguiente relación.

$$N^{\circ} \text{ bancos} = \frac{\textit{Profundidad del depósito}}{\textit{Altura del Banco}}$$

Figura 21

Modelo típico del banco



Nota. Tomado de (Krabbenhoft & Lyamin, 2015).

3.2.5. Características de los taludes

Los bancos, el ángulo de talud inter rampa y el ángulo de talud general, son componentes de los taludes de un tajo abierto en minería superficial siendo tres en total , es así que los bancos están definidos por su altura , su ángulo de cara y el ancho de berma de seguridad y estos a su vez se hallan relacionados con el ángulo de talud inter rampa como se observa en la relación a continuación:

$$W = hb (\cot \alpha_r - \cot \alpha_b)$$

$$\alpha_r = \text{Ángulo de Talud Interrampa}$$

$$\alpha_b = \text{Ángulo de Cara de Banco}$$

$$hb = \text{Altura de Banco}$$

$$W = \text{Ancho de Berma de Seguridad}$$

Para determinar el ancho de berma de seguridad se tiene una relación empírica frecuentemente empleada, la cual parte de los criterios desarrollados por (Ritchie, 1963), con cambios posteriores por parte de (Call & Savely, 1990), expresadas mediante las relaciones:

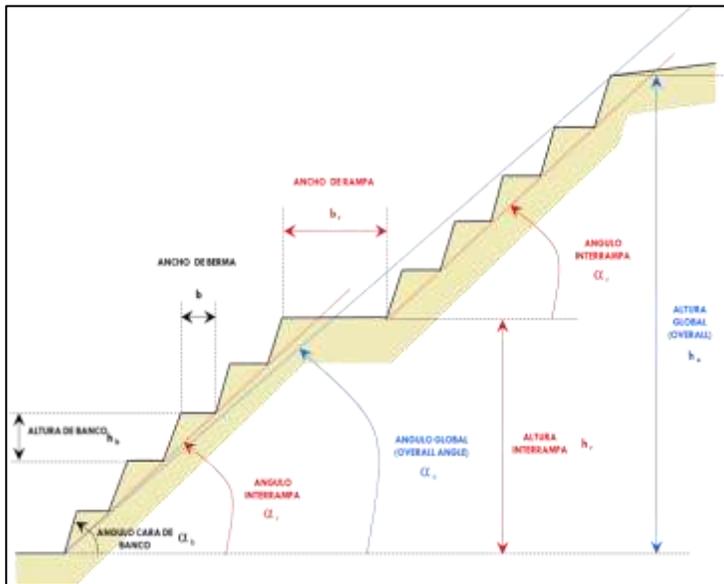
$$W = 0.2 h_b + 2.0, \text{ en caso altura de bancos (} h_b \text{) menores o iguales a 9.0 metros.}$$

$$W = 0.2 h_b + 4.5, \text{ en caso altura de bancos (} h_b \text{) Mayores a 9.0 metros.}$$

Teniendo en consideración este criterio teórico, se continua con la determinación del ángulo de talud inter rampas.

Figura 22

Parámetros que definen un talud de mina a cielo abierto



Nota. Tomado de (Read & Stacey, 2009).

En el marco de este criterio y su aplicación indicado, se determinó para este estudio un ancho de berma de seguridad estableciendo un mínimo de 6.5 metros.

- Angulo del banco = $\alpha_b = 60$ grados.
- Altura de banco = $h_b = 10$ metros.

- Ancho de berma mínimo = $b = 6.5$ metros.
- Ángulo interrampa = $\alpha = 39$ grados.

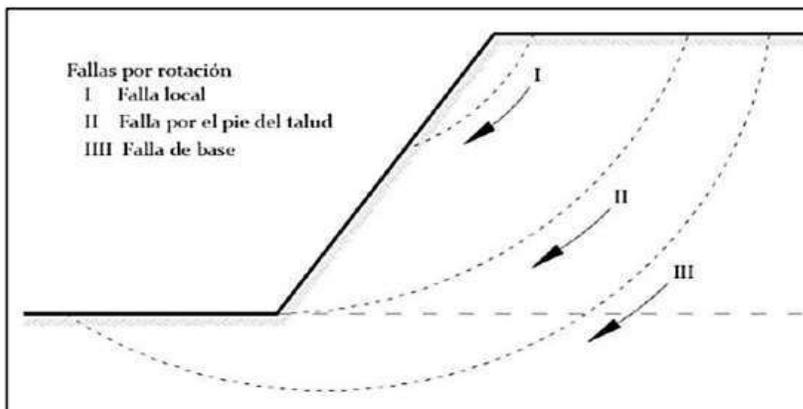
Hay preponderancia en los deslizamientos de taludes de suelos debido a que se ha tomado en cuenta que la geometría de ruptura es la curva con forma diversa de acuerdo a la morfología y estratigrafía del talud. La superficie de rotura frecuentemente es casi circular, pasando exactamente por el pie del talud (deslizamiento de pie). Sin embargo, podría ser circular cuando pasa por debajo del pie de talud (deslizamiento profundo). De la misma manera, podría ocurrir una falla planar si existen recubrimientos de suelos sobre roca, esto generalmente sucede en las laderas naturales o una falla poligonal cuando existen estratos blandos.

Las fallas que actúan en rotación pueden presentarse pasando la superficie de falla por el pie del talud (falla de base), o delante del pie (falla por el pie del talud). Además, pueden presentarse las llamadas fallas locales, que ocurren en el cuerpo del talud.

Se presentan estos tipos de fallas más usuales en taludes ideales.

Figura 23

Tipos de fallas en deslizamientos rotacionales



Nota. Tomado de (Juárez & Rico, 1973).

3.2.6. Factor de Seguridad

En la mayoría de los métodos orientados a determinar la seguridad de un talud se hace uso del cálculo del factor o coeficiente de seguridad (F.S). El cual se define como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla.

$$FS = \frac{\sum \text{Resistencia al corte}}{\sum \text{Esfuerzo cortante}}$$

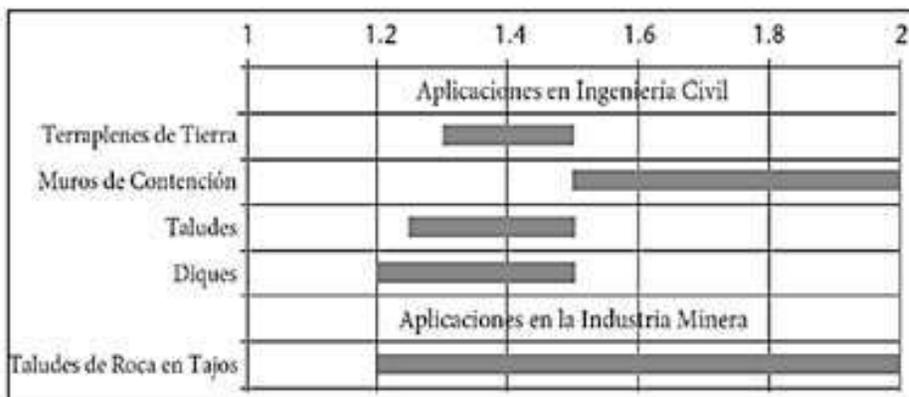
En superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes:

$$FS = \frac{\sum \text{Momento resistente}}{\sum \text{Momento actuante}}$$

Dado el bajo y reducido desarrollo del tema sobre los niveles de aceptación para los Factores de Seguridad más apropiados en los diseños de taludes. Los valores más comunes han sido fijados por observaciones y a las experiencias de prueba y error en el campo, Un caso de los valores de los Factores de Seguridad aceptables establecidos con estos métodos está dado en la Figura N° 24.

Figura 24

Factores de seguridad aceptables



Nota. Tomado de (Read & Stacey, 2009).

3.2.7. La Estabilidad de Taludes

Está enfocada a “la seguridad de una masa de suelo o roca contra la falla o movimiento. Así, los criterios de estabilidad de taludes pretenden establecer en un instante dado cuál será la inclinación apropiada del corte, siendo ésta por lo general la más escarpada que se sostenga el tiempo necesario sin caerse” (Escobar Chanalata y Flores Carvajal, 2017).

La estabilidad de las pendientes se caracteriza por muchas fuentes de incertidumbre, como las propiedades del suelo o roca, la carga, la presión del agua (Escobar Chanalata y Flores Carvajal, 2017).

Los factores internos y externos son los que factores que influyen en la estabilidad de taludes, Es así que los factores internos, condicionan las diferentes tipologías de deslizamiento, los mecanismos y modelos de rotura.

Por otro lado, los factores externos actúan sobre el material y dan lugar a modificaciones en las condiciones iniciales de las laderas, iniciando u ocasionando las roturas por las variaciones que ejercen en el estado de equilibrio, teniendo así tres tipos de acciones: la infiltración de agua en el terreno, las vibraciones y las modificaciones antrópicas (Keefer, 1984).

Los principales factores acorde a lo mencionado, se tiene:

- La litología o formación geológica.
- La estructura geológica.
- La geomorfología.
- Estado de meteorización.
- Pendiente y relieve.
- El clima y la hidrología.

- La sismicidad.
- Cobertura vegetal y el efecto isotrópico y anisotrópico.

3.2.8. Análisis de estabilidad de taludes

El término talud hace alusión a una porción del talud natural en el que su perfil original ha sido modificado por intervenciones artificiales relevantes con respecto a la estabilidad. Sin embargo, el caso de deslizamiento se alude a una situación de inestabilidad que afecta a los taludes naturales y que involucra grandes volúmenes de suelo.

3.2.9. Introducción al análisis de estabilidad

Existe una frecuencia de casos en los que se tiene que tratar con un material que si está saturado es al menos bifásico, complicando esto de manera considerable el tratamiento de las ecuaciones de equilibrio. Considerando también que, es prácticamente imposible definir una ley constitutiva de validez general, porque los suelos tienen un comportamiento no lineal y a pequeñas deformaciones, son anisotrópicos, dependiendo así su comportamiento no solo del estrés desviador sino también del estrés normal. Por el mismo hecho de que las dificultades anteriores se presentan como supuestos simplificados.

Se utilizan leyes constitutivas simplificadas considerando el modelo rígido, perfectamente plástico. Se toma en cuenta que la resistencia del material está expresada únicamente por los parámetros cohesión (c) y ángulo de resistencia al corte (ϕ), constante para el suelo y característica del estado plástico; por lo tanto, se asume válido el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

3.2.10. Método de equilibrio límite

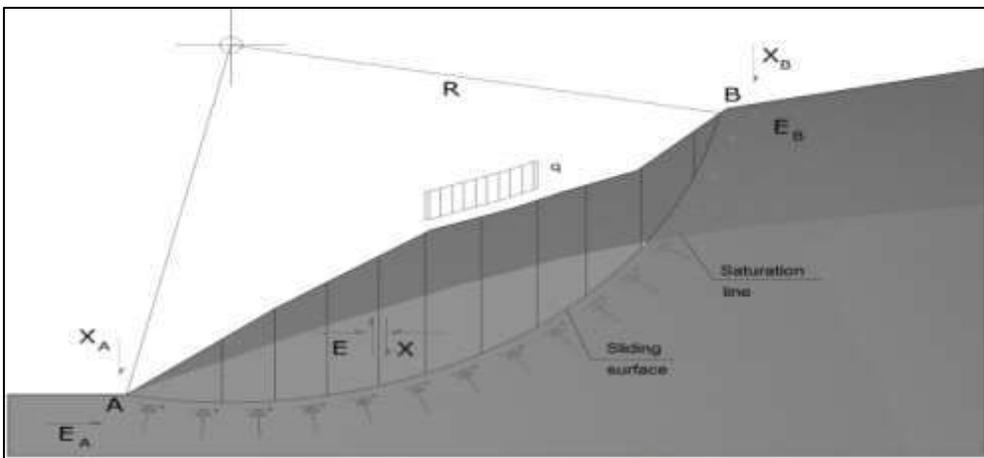
El método de equilibrio límite se enfoca en el estudio del equilibrio entre un cuerpo rígido, como la pendiente, y una superficie de deslizamiento de cualquier forma (recta, arco de círculo,

espiral logarítmica, etc.). A partir de este equilibrio se calculan los esfuerzos cortantes (τ) y se contrastan con la resistencia al corte (τ_f), calculada según el criterio de falla de Mohr-Coulomb. De esta verificación se deriva la primera indicación de estabilidad como factor de seguridad:

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau}$$

Figura 25

Análisis del mecanismo de falla con método de equilibrio límite



Nota. Tomado de (Duncan et al., 2014).

En la diversidad de métodos de equilibrio, algunos tienen en cuenta el equilibrio global del cuerpo rígido (Culman), mientras que otros dividen el cuerpo rígido en rodajas para atender su falta de homogeneidad y toman en cuenta el equilibrio de cada uno de ellos (Fellenius, Bishop, Janbú, etc.).

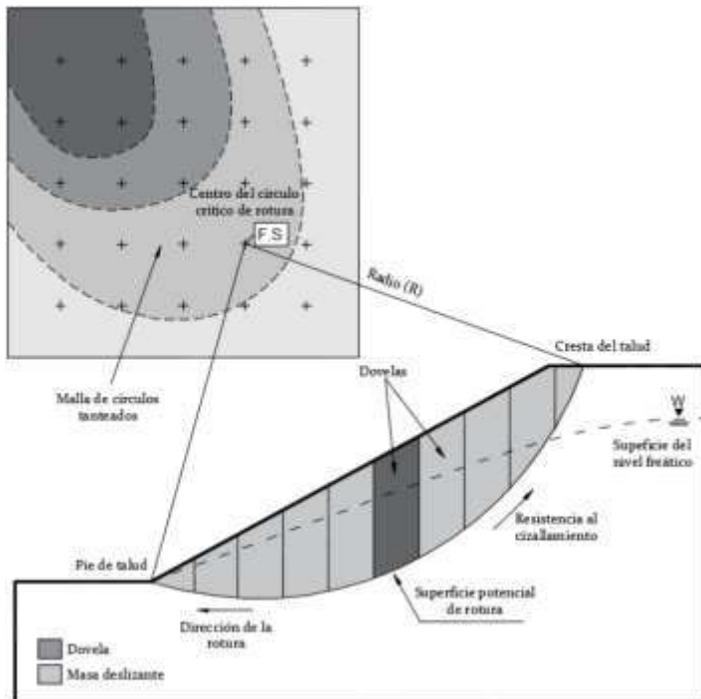
3.2.11. Método de Dovelas o Rebanadas

Es un método para analizar la estabilidad de los taludes en dos dimensiones. Considerando la masa que se desliza por encima de un talud que se presume una fractura y dividiendo esta misma en gran número de rebanadas.

La fuerza que actúa en cada una de las rebanadas se obtiene considerando el equilibrio mecánico.

Figura 26

Dovelas de la masa deslizante



Nota. Tomado de (Turpo Phuño, 2018).

3.2.12. Método de Fellenius

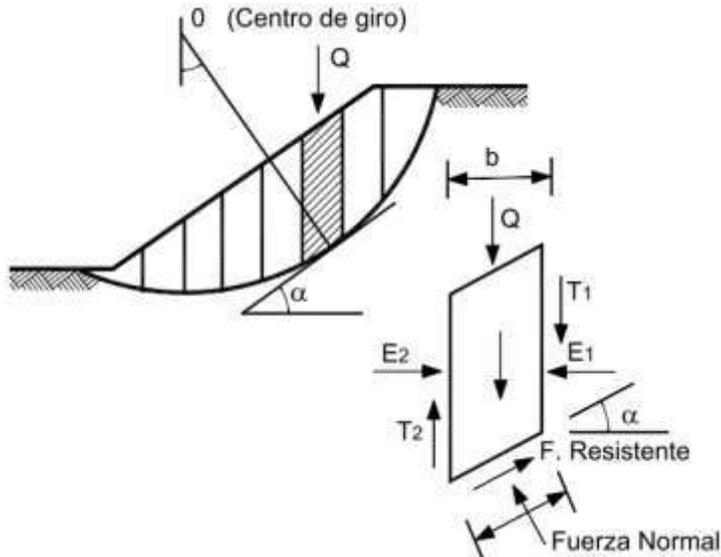
Este método asume superficies de falla circulares, divide el área de falla en dovelas verticales, se obtiene las fuerzas actuantes y resultantes para cada dovela y con la sumatoria de estas fuerzas se obtiene el factor de seguridad. (Suárez Díaz, 1998).

- a. El peso o fuerza de gravedad, la cual se puede descomponer en una tangente y una normal a la superficie de falla.
- b. Las fuerzas resistentes de cohesión y fricción que actúan en forma tangente a la superficie de falla.

- c. Las fuerzas de presión de tierra y cortante en las paredes entre dovelas, las cuales no son consideradas por Fellenius, pero sí son tenidas en cuenta en otros métodos.

Figura 27

Fuerzas que actúan sobre una dovela



Nota: Tomado de (Suárez Díaz, 2009, p. 154).

$$F.S = \frac{\sum[(C' * b * \sec \alpha) + (W * \cos \alpha - \mu * \sec \alpha) * \tan \phi]}{\sum(W * \sin \alpha)}$$

En donde:

α = Ángulo del radio del círculo de falla con la vertical bajo el centro de cada dovela.

W = Peso total de cada dovela.

μ = Presión de poros.

b = Ancho de la dovela.

C' = Parámetros de resistencia del suelo (Cohesión efectiva).

ϕ = Parámetros de resistencia del suelo (Ángulo de fricción interna).

Q = Fuerza horizontal de agua debido a una grieta de tensión.

Si $Q = 0$

3.2.13. Método de Bishop

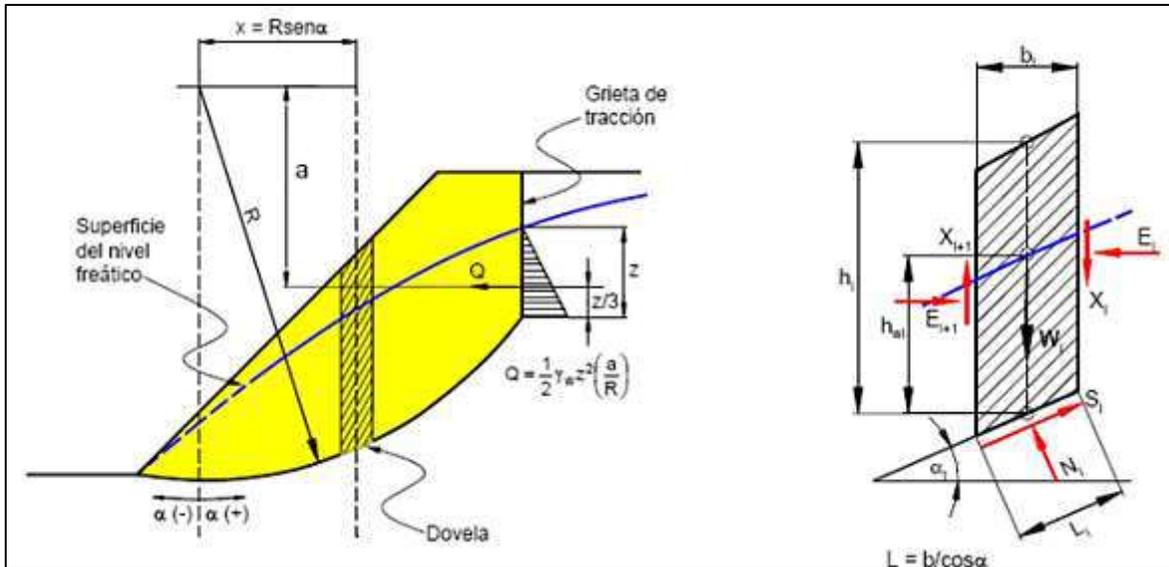
Es parte del método de rebanadas que es aplicable solo a superficies de falla circular lo cual considera equilibrio de momentos, fuerzas de corte vertical y no considera las fuerzas de corte horizontal.

Las ecuaciones usadas para resolver el problema son:

$$\sum F_y = 0, \sum M_o = 0 \text{ Criterio de rotura.}$$

Figura 28

Interpretación gráfica del Método de Bishop



Nota. Tomado de (Duncan et al., 2014).

$$F.S = \frac{\sum[(C' * b) + (W - \mu * b) * \tan \phi' / \eta]}{\sum(W * \sin \alpha)}$$

En donde:

b = Ancho de la dovela.

W = Peso de cada dovela.

C', ϕ = Parámetros de resistencia del suelo (cohesión, ángulo de fricción interna).

μ = Presión de poros en la base de cada dovela = $\mu = \gamma_w * h_w$.

α = Ángulo del radio y la vertical en cada dovela.

Q = Fuerza horizontal de agua debido a una grieta de tensión.

Si $Q = 0$

3.2.14. Método de Spencer

El método Spencer es parte del método de rebanadas que consiste en establecer las fuerzas horizontales y verticales para obtener dos coeficientes de seguridad uno relacionado con el equilibrio de momentos y otro con el equilibrio de fuerzas al final se determinara que un talud es seguro, si las dos fuerzas antes mencionadas son iguales.

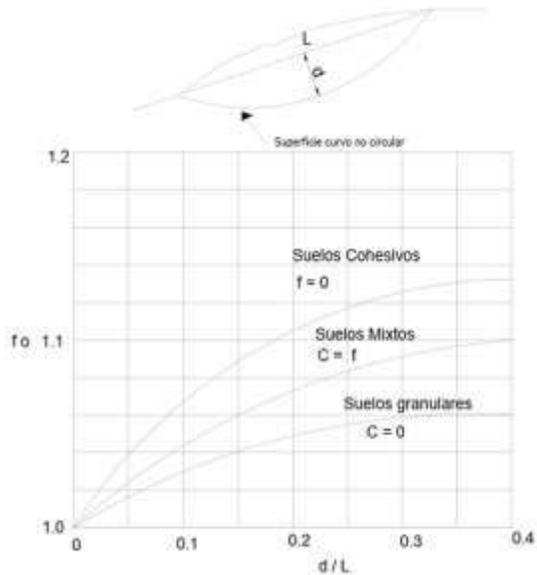
3.2.15. Método de Janbú

El método de Janbú supone que la resultante de fuerzas entre rebanadas es horizontal, además, establece un factor de corrección. El factor f_o depende de la curvatura de la superficie de falla.

Cuando las propiedades del suelo o masa de roca deslizada varían a lo largo del talud o cuando la forma de la superficie de falla no es circular como el resultado de alguna falla estructural de la interfaz del suelo/roca se puede aplicar este método.

Figura 29

Diagrama para determinar el factor de corrección



Nota. Tomado de (Suárez Díaz, 1998).

El método está diseñado para cualquier superficie de falla. Supone que la interacción entre rebanadas es nula, pero a diferencia de Bishop, el método busca el equilibrio de fuerzas y no de momentos.

3.2.16. Método de Morgenstern-Price

El método Morgenstern-Price es un método general de cortes realizados en la base del equilibrio límite. Debe satisfacer el equilibrio de fuerzas y momentos actuando en bloques individuales. Los bloques son creados dividiendo el suelo sobre la superficie terrestre dividiendo planos.

- El grado de alteración de la masa deslizante provee un método visual muy usado para distinguir entre un movimiento circular o no circular.

- Cuando la masa del suelo se desplaza rotando como un cuerpo rígido, la alteración es relativamente pequeña, pero una alteración más severa se observa usualmente, cuando la falla ocurre con una trayectoria no circular.

3.3. Estudio Geomecánica

La clasificación geomecánica de la masa rocosa se realiza utilizando el criterio de (Bieniawski, 1989). Los valores de designación de la calidad de la roca (RQD) en la zona de excavaciones del tajo sur fueron reportados por (Santivañez Yauri, 2019).

Las fuentes de información para la clasificación del macizo rocoso de la zona de evaluación fueron principalmente los datos del corte geotécnico de los testigos. Muestra la clasificación de la composición del macizo rocoso en rangos menores apropiados tal como se detalla en la tabla 7.

Tabla 7

Criterios de clasificación de la masa rocosa

Tipo de Roca	RMR	Calidad
II	>60.00	Buena
IIIA	51.00 - 60.00	Regular A
IIIB	41.00 - 50.00	Regular B
IVA	31.00 - 40.00	Mala A
IVB	21.00 - 30.00	Mala B
V	<21.00	Muy mala

Nota. Tomado de Área de geomecánica de la mina Antapaccay.

Utilizando todos los datos geomecánicos recopilados, se examinan las estadísticas de ocurrencia de los valores de calidad del macizo rocoso (expresados como RMR) en la zona mineralizada y la roca encajonante. El 26% de la calidad del macizo rocoso corresponde a calidad mala B con un RMR promedio de 26, este porcentaje es algo mayor que otras propiedades. Los

porcentajes de calidad restantes corresponden a los intervalos de calidad más altos y son muy similares en porcentajes de la siguiente manera: calidad Mala A simboliza el 18%, con RMR promedio igual a 35, calidad regular B simboliza el 17% y el valor de RMR con promedio de 46, la calidad regular A asciende a un 19 % con un RMR promedio de 55 y del mismo modo la calidad Buena asciende el 18 % con un RMR promedio de 67. Sin embargo, la calidad encuentra con un mínimo porcentaje de 2% con un RMR promedio de 19.

En la tabla 8 se resume el macizo rocoso mineralizado la calidad del yacimiento en cada sector y la calidad de la roca.

Tabla 8

Clasificación de la masa rocosa

Cuerpo	Tramo	Calidad RMR
Sector Norte	roca superior	IIIB, IVA
	mineral	IIIB, IVA y IVB
	roca inferior	IIIB, IVA y IVB
Sector Sur	roca superior	IIIA, IIIB y IVA
	mineral	IIIA y IIIB
	roca inferior	IIIA y IIIB

Nota. Tomado de Área de geomecánica de la mina Antapaccay.

Los logueos geotécnicos de los testigos rocosos de los sondajes diamantinos, utiliza el criterio de (Laubscher, 1990), para la clasificación geomecánica RMR de (Bieniawski, 1989), adecuada para la minería subterránea y tiene aplicabilidad principalmente en los métodos de minado por hundimiento.

- **Aberturas máximas de las excavaciones y diseño del tipo de soporte**

Se presenta tres categorías, las cuales son: excavaciones permanentes, excavaciones temporales y tajos. De los cuales solo se estudiará en excavaciones permanentes.

- **Excavaciones permanentes.**

De acuerdo a los resultados de clasificación del macizo rocoso y zonificación geomecánica del sitio, la colocación del macizo rocoso es hacia el extremo occidental de las piezas de mejor calidad, por lo que las excavaciones permanentes se ubican preferentemente en el sector donde varía la calidad del macizo rocoso. Desde Regular A (DE-III A) hasta Mala A (DE IV A), así como también existen pequeños sectores de calidad Mala B (DE-IV B).

Tabla 9

Aberturas máximas de las excavaciones permanentes

Dominio	Rango RMR	Promedio RMR	Abertura máxima (m)
DE-III A	51.00 – 60.00	55.00	5.20
DE-III B	41.00 – 50.00	45.00	3.30
DE-IV A	31.00 – 40.00	35.00	2.10
DE-IV B	21 – 30	25	1.4
DE-V	< 21	15	< 1

Nota. Tomado de Área de geomecánica de la mina Antapaccay.

Las aberturas máximas dadas en la tabla 9 corresponden a excavaciones sin apoyo sistemático, es decir, por ejemplo, para roca DE-III A RMR 55, las aberturas de 5,2 metros o menores requieren solo sostenimiento esporádico de acuerdo al requerimiento de la roca.

3.4. Módulo de Monitoreo

Con este método se puede hacer el seguimiento en tiempo real de las mediciones de los instrumentos de forma centralizada y contextualizada. La representación de los instrumentos es

realizada en mapas 2D, a través de las herramientas WEB GIS o en modelos digitales del terreno (DTM), que son reproducidos en 3D, de acuerdo con su posición real georreferenciada.

Figura 30

(a) Interfaz de distribución de todos los sensores de monitoreo, (b) Realidad aumentada para la visualización de instrumentos, (c) Central de control despacho geotécnico

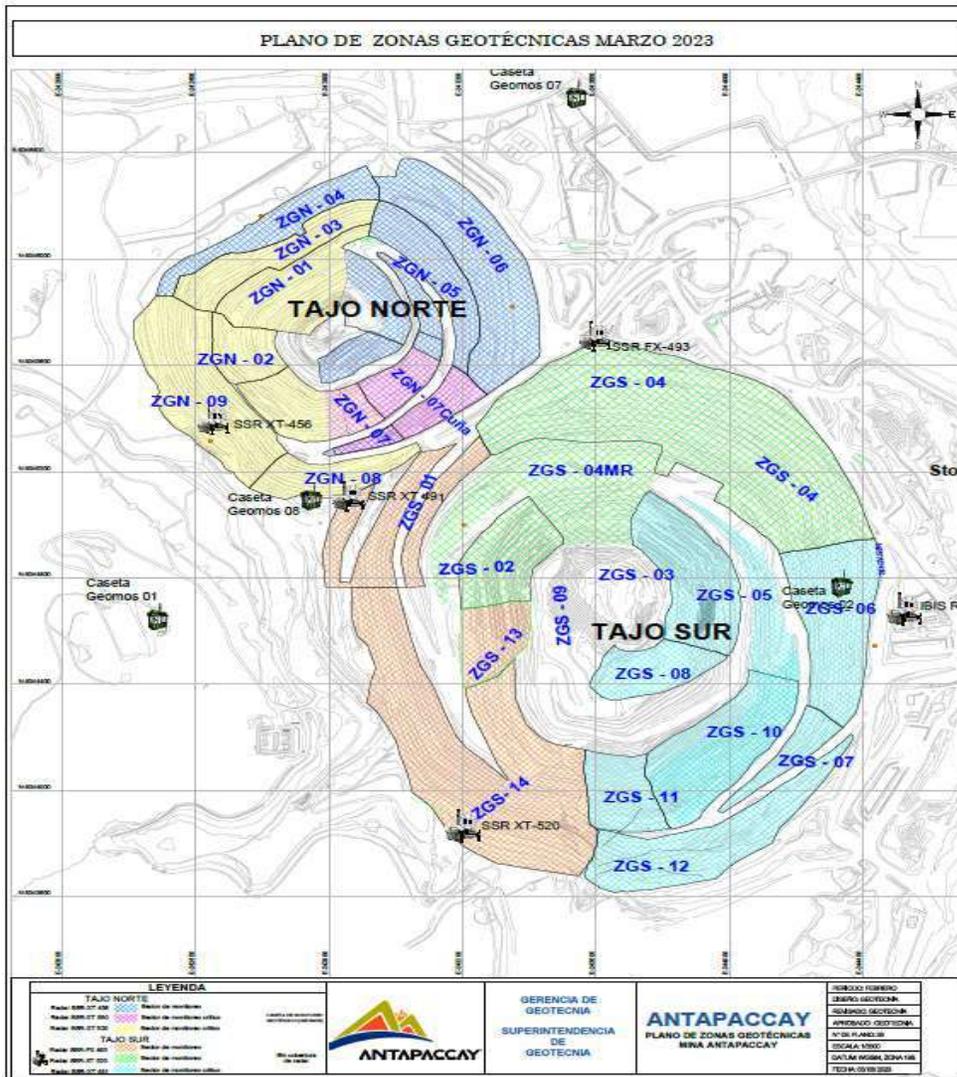


Nota. Tomado de Área de operaciones de la mina Antapaccay.

A continuación, se muestra algunas imágenes que muestran las zonas.

Figura 31

Plano de la zona geotécnica en estudio



Nota. Tomado de Área de geotecnia de la mina Antapaccay.

3.4.1. Base de Datos

Contiene valores de los parámetros que interfieren en la estabilidad del talud, por ejemplo, Peso unitario (γ), Cohesión del suelo (C_{ef}), Ángulo de fricción interna (ϕ_{ef}), Módulo elástico (E), Coeficiente de poisson (ν), Peso unitario saturado (γ_{sat}), Módulos de descarga/recarga (E_{ur}) y Ángulo de dilatación (Ψ). La base de datos a utilizar se muestra en la tabla 2.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES

4.1. Configuración de cálculo y parámetros de entrada

Este método de elementos finitos (MEF) viene a ser un método numérico eficiente y de calidad. Una de las ventajas del MEF es su capacidad para considerar variabilidad espacial en las propiedades del suelo y los elementos de la heterogeneidad dentro del talud, también se pueden incorporar al modelo MEF diferentes capas de suelo con sus características. Estas características pueden ser la resistencia y la permeabilidad. Esta posibilidad constituye una representación más realista del comportamiento del talud, siendo útil para evaluar taludes con estratigrafía compleja o perfiles de suelo de varias capas (Ali et al., 2017).

El MEF también permite considerar múltiples condiciones de contorno y realizar análisis con carga sobre el talud. Existe la posibilidad de simular varias condiciones ambientales y de carga, así como cambios en los niveles de agua subterránea, infiltración de lluvia y cargas aplicadas, para comprender sus efectos en la estabilidad de la ladera (talud). Esta flexibilidad permite evaluar las condiciones de estabilidad en caso de corto y a largo plazo, teniendo en cuenta factores como las presiones intersticiales, la consolidación del suelo y las deformaciones dependientes del tiempo (Krabbenhoft & Lyamin, 2015; Li et al., 2019; Sloan, 2013).

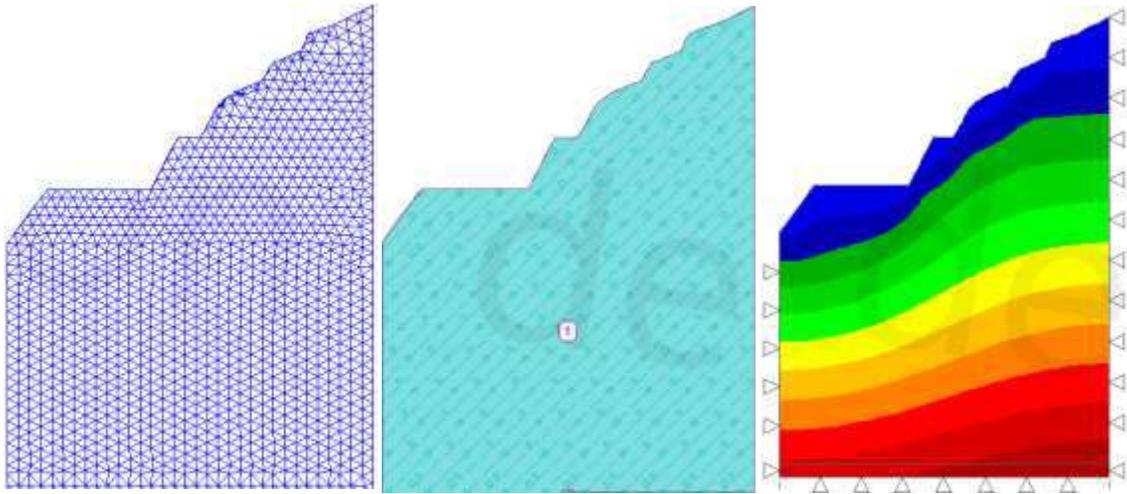
Además, el MEF proporciona información detallada sobre las distribuciones de esfuerzos y deformaciones dentro del talud. Se pueden identificar posibles mecanismos de falla, como tipos de desplazamientos, deformaciones o licuefacción del suelo, mediante el análisis de patrones de esfuerzos y desplazamientos. Al evaluar los factores que inciden en la estabilidad de taludes (laderas), como la presión intersticial, las propiedades del suelo y los elementos de refuerzo, el MEF ayuda a tomar decisiones informadas sobre el diseño de taludes (laderas) y las estrategias de mitigación del riesgo.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el MEF requiere una calibración adecuada de los parámetros del suelo y una validación con las mediciones de campo para garantizar resultados precisos. La selección de modelos constitutivos y técnicas numéricas apropiadas es crucial para obtener resultados confiables. Además, el análisis MEF puede ser computacionalmente intensivo y la complejidad del modelo debe equilibrarse cuidadosamente para lograr resultados eficientes y precisos.

En este contexto, una herramienta valiosa en la evaluación de la estabilidad de taludes viene a ser el método de elementos finitos, ya que permite realizar el análisis detallado de taludes de geometrías complejas, del comportamiento del suelo y de las condiciones de contorno. Al proporcionar información sobre los patrones de esfuerzos y deformaciones, el MEF ayuda a identificar posibles mecanismos de falla y diseñar medidas de mitigación adecuadas, lo que en última instancia mejora la seguridad de taludes (Krabbenhoft y Lyamin, 2015). Además, en este estudio se utilizó el código de elementos finitos de Geo5 Versión 2022.

Figura 32

Configuración del talud para el análisis con MEF



Nota. Adaptado del software Geo5 versión 2022.

En el método de elementos finitos, este último análisis, se puede aplicar la técnica denominada reducción de la resistencia al corte como se lleva a cabo en (Krabbenhoft y Lyamin, 2015). El ángulo de dilatación, el módulo del suelo o el tamaño del dominio de la solución no son parámetros críticos en esta técnica (Cheng et al., 2007). El factor de seguridad se puede obtener, asumiendo un criterio de falla de Mohr Coulomb, reduciendo los parámetros de resistencia de manera incremental, a partir de valores no factorizados $\varphi_{disponible}$ y $c_{disponible}$, hasta que no se pueda encontrar ningún equilibrio en los cálculos. Los parámetros de resistencia correspondientes se pueden denotar como φ_{falla} y c_{falla} y el factor de seguridad η_{fs} se define como:

$$\eta_{fs} = \frac{\tan \varphi_{disponible}}{\tan \varphi_{falla}} = \frac{c_{disponible}}{c_{falla}}$$

Hay dos posibilidades para llegar al factor de seguridad definido anteriormente.

La primera posibilidad es llevando a cabo un análisis con parámetros no factorizados que modelan todas las etapas de construcción requeridas. Los resultados representan el

comportamiento de las condiciones de carga de trabajo en los pasos de construcción definidos. A este análisis le sigue una reducción automática de los parámetros de resistencia del suelo hasta que ya no se pueda alcanzar el equilibrio en el cálculo. El procedimiento involucra el proceso de construcción. Este enfoque a veces se denomina técnica de reducción.

La segunda posibilidad está en utilizar parámetros factorizados desde el principio, es decir, los valores de resistencia se reducen, nuevamente en incrementos, pero se realiza un nuevo análisis para todas las etapas de construcción para cada conjunto de parámetros. Si se utilizan incrementos suficientemente pequeños, el factor de seguridad se obtiene nuevamente a partir del cálculo cuando no se pudo lograr el equilibrio. Esta segunda posibilidad es la que se utiliza en el Geo5 Versión 2022.

Cuando se usa un criterio de falla, en el caso de ambos métodos es sencillo de aplicar cuando es utilizado un criterio de falla estándar de Mohr-Coulomb. Es así que, en el método de elementos finitos, se toma en cuenta las zonas dentro de la masa de suelo donde la resistencia al corte del suelo no es capaz de resistir el esfuerzo cortante aplicado ya que es aquí donde se produce la falla, por lo que no hay necesidad de buscar una suposición acerca de la forma o ubicación de la superficie de falla.

4.2. Método de evaluación rápida de la estabilidad de un talud

En la Figura N° 31, se muestra un diagrama de flujo que dispone el procedimiento para desarrollar la comparación del análisis de la estabilidad del talud usando elementos finitos y otros métodos, a simple vista el análisis con el MEF tiene más pasos ya que es un método más complejo que los métodos tradicionales como el Bishop, Janbú, Spencer, etc. El MEF incluye la consideración de factores de seguridad, módulo elástico módulo de carga y descarga, ángulo de dilatación, peso unitario considerando también en el caso del suelo, la propiedad del mismo con

características isotrópicas y uniformes con el modelo Drucker Prager. Este es un modelo constitutivo que analiza el daño isotrópico a través del análisis de elementos finitos para determinar los modos de falla del suelo o la roca, considerando la interacción de la herramienta de corte del suelo y la roca.

4.3. Modelo de evaluación rápida de factores de seguridad

4.3.1. Cálculo de factores de seguridad

Según Michalowski R. L., (2002), se toma como eje x el término adimensional $(c/\gamma H \tan\phi)$ y como eje considerando también el factor de seguridad relativo $(FS/\tan\phi)$; además, se tiene la ley de distribución del factor de seguridad en el caso de un talud de suelo en condiciones estáticas y pseudoestáticas, bajo las mismas condiciones de ángulo de pendiente, el factor de seguridad relativo $(FS/\tan\phi)$, se incrementa con el aumento del término adimensional $(c/\gamma H \tan\phi)$; bajo los mismos parámetros de resistencia, cuanto mayor es el ángulo de la pendiente, menor es el factor de seguridad relativo; cuanto mayor es el coeficiente sísmico horizontal, menor es el factor de seguridad relativo. Además, los factores de seguridad de 1 a 5, como se verá en los análisis posteriores, la ecuación de regresión del factor de seguridad en el caso del ángulo de pendiente de 15° en condiciones estáticas se puede obtener de la siguiente manera:

$$FS = \left[-8.71 \left(\frac{c}{\gamma H \tan\phi} \right)^2 + 13.69 \left(\frac{c}{\gamma H \tan\phi} \right) + 4.07 \right] \times \tan\phi$$

4.3.2. Análisis del factor de ponderación del ángulo de pendiente.

Según los métodos del factor de ponderación del ángulo de pendiente para roca tal como se detalla en la tabla 10.

Tabla 10*Datos de los parámetros requeridos para el análisis*

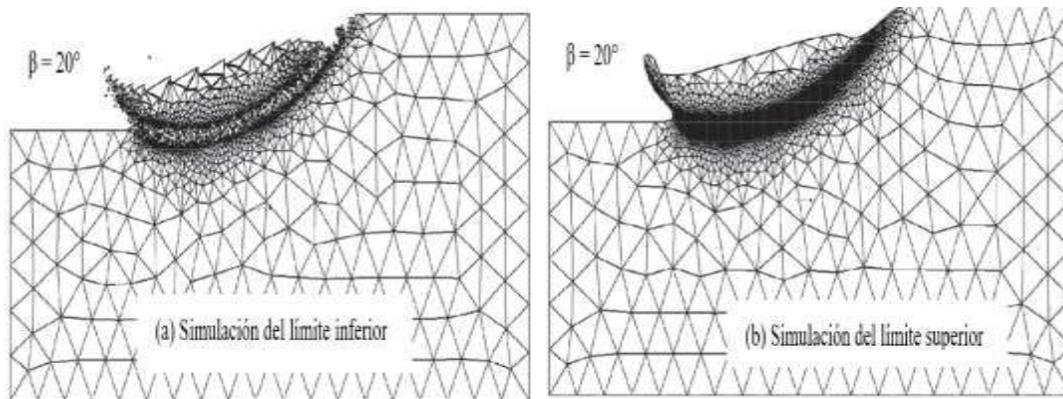
Peso Unitario (γ)	Modulo Elástico (E)	Coficiente de Poisson (ν)	Peso unitario saturado (γ_{sat})	Módulo de carga y descarga (Eur)	Angulo de fricción interna (ϕ_{ef})	Cohesión del suelo (Cef)	Angulo de dilatación (ψ)	Estado
20	25	0.20	26	28	45	95	0.01	Estable
28	250	0.10	30	280	50	145	0.01	Estable
41	320	0.20	48	330	44	138	0.00	Estable
27	277	0.30	31	284	41	148	0.00	Estable
38,68,27,41,65	302	0.20	37	397	46,42,42	176,173,173	0.00	Estable
20	115	0.20	22	165	25	57	0.00	Falla
23	225	0.21	24	237	34	170	0.00	Estable
21	217	0.20	25	246	37	75	0.11	Falla
22	219	0.20	23	233	31	79	0.09	Falla
26	215	0.13	19	234	38	91	0.02	Estable
24,22	227	0.19	28	238	34,32	178,170	0.01	Falla
20	223	0.20	22	230	32	170	0.00	Estable
27	277	0.35	31	283	73	155	1.70	Estable
41	115	0.22	41	137	73	93	0.50	Estable
53	193	0.47	63	213	67	112	0.97	Estable
48	112	0.05	50	118	72	171	0.14	Estable

Nota. Muestra el conjunto de datos obtenidos de la base de datos de estudios geotécnicos.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 33

Modelo típico de talud



Nota. Tomado de (Bui et., 2020).

Figura 34

Zona de estudio-Área Geotecnia

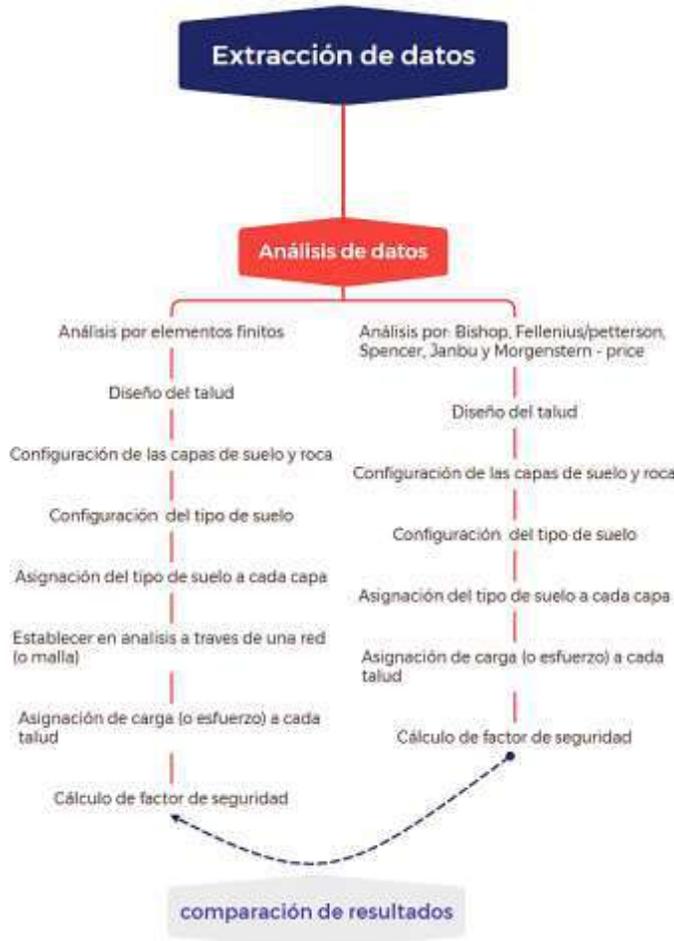


Nota. Tajo Sur - Compañía Minera Antapaccay.

De la Figura N° 34, se muestra imágenes de la zona de estudio, como las alturas y ángulo de inclinación de taludes. En este tramo se observa zonas proclives a deslizamiento dependiendo de las características geotécnicas.

Figura 35

Diagrama de flujo del análisis de estabilidad



Nota. Elaboración propia.

Por otro lado las características de la método sugiere un procedimiento en el que es necesario llevar a cabo la obtención del factor de seguridad bajo los lineamientos y requerimiento y tomando en cuenta los parámetros requeridos para el desarrollo de elementos finitos y por otro lado con propósitos comparativos de eficiencia y precisión se debe llevar a cabo el cálculo para los mismos taludes del factor de seguridad pero con métodos tradicionales (siendo los métodos tradicionales el método de Bishop, Spencer, etc.). El procedimiento indicado para la presente investigación se presenta en la Figura N° 35.

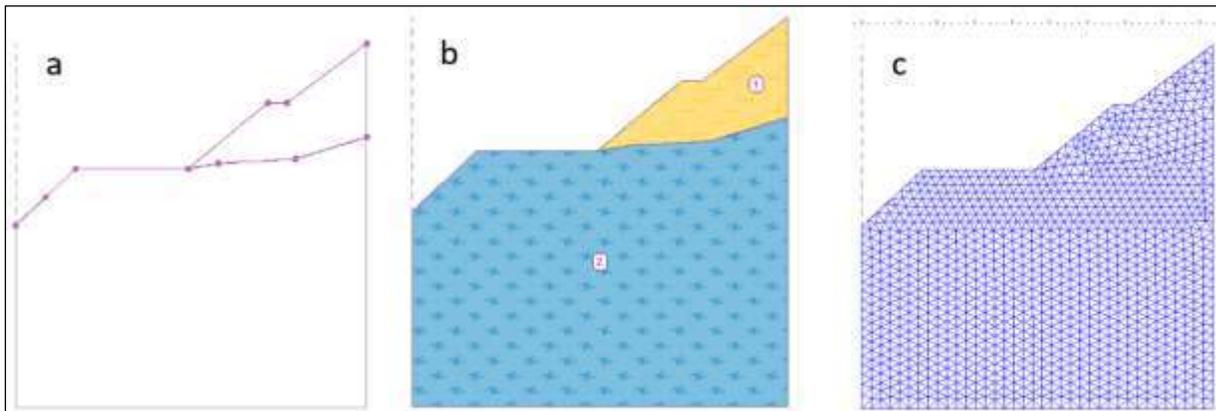
4.4. Procedimiento para el análisis de la estabilidad de taludes con elementos finitos.

En la presente sección se va analizar el grado de estabilidad de los taludes a través de la determinación del factor de seguridad con el uso del Método de los Elementos Finitos.

El análisis se va llevar a cabo primero sin tomar en cuenta la acción de una sobrecarga y luego bajo la acción de una sobrecarga (en este caso la carga es de 35 kN/m^2). En el caso de todas las etapas de construcción (incluidos los puntos de interfaz individuales) se observa en el esquema de geometría de pendiente el cual se muestra en la figura. Luego realizar la estabilización del talud mediante anclajes pretensados.

Figura 36

Imágenes de análisis de estabilidad de taludes



Nota. Elaboración propia.

Se tiene dos tipos de suelo en el perfil mostrado en la figura N° 36, que consta en este caso de los parámetros mostrados en la tabla 12.

Tabla 11*Parámetros considerados en el diseño del talud con elementos finitos*

Parámetros del suelo o roca	limo gravoso	arenisca
Peso unitario del suelo: γ [kNm³]	24	22
Módulo de elasticidad: E [MPa]	227	227
Relación de Poisson: ν [-]	0.20	0.18
Cohesión del suelo: c_{eff} [kPa]	178	170
Ángulo de fricción interna: ϕ_{ef} [°]	34	32
Ángulo de dilatación: ψ [°]	0.0	0.0
Peso unitario saturado: γ_{sat} [kNm³]	28	28

Nota: No se considera valores diferentes del módulo E para descarga/recarga ($E_{ur} = E$).

Particularmente o por cuestiones de disponibilidad, se tiene acceso al software *GEO 5 – MEF* para el análisis, cuyos pasos se mencionan a continuación.

Topografía: El diseño topográfico consiste en ingresar las coordenadas de los puntos vértice del talud estableciendo la interfaz, el tipo de suelo, roca, considerando también la generación de la malla con características infinitesimales. Como se muestra en la Figura N° 36a, se diseña la topografía del talud a través de la inserción de las coordenadas, detalladas en la tabla 12.

Tabla 12*Coordenadas de la superficie de taludes a analizar*

Superficie Talud 11			superficie Talud 5				Interface inferior Talud 5	
Nro.	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)
1	8.00	7.50	0.00	0.00	52.29	25.76	30.37	5.56
2	16.00	15.00	3.05	3.80	54.92	30.84	54.98	7.48
3	46.00	15.00	29.38	3.80	64.86	50.10	59.52	10.15
4	67.20	32.50	30.37	5.56	80.00	50.10	80.00	13.45
5	72.30	32.50	41.63	25.76				
6	93.60	48.30	52.29	25.76				

Interface Talud 11			interface superior Talud 5			
Nro.	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)	X (m)	Z (m)
1	46.00	15.00	54.92	30.84	80.00	36.27
2	54.00	16.40	62.74	33.16		
3	74.60	17.60	66.31	32.15		
4	93.60	23.50	71.60	34.56		

Nota. Adaptado del Área Geotecnia de la Mina Antapaccay.

Ahora se establece los parámetros respectivos de los suelos como se puede ver en la Figura N° 37, para luego asignar los suelos a áreas individuales. Se elegirá el modelo Drucker-Prager a razón de la respuesta más flexible de la estructura ya que con el modelo clásico de Mohr Coulomb según (Matthews et al., 2014). Se considera que el ángulo de dilatación ψ para ambas capas de suelo es igual a cero, es decir, el material no cambia su volumen cuando se expone a un esfuerzo cortante. Al realizar un análisis de estabilidad de taludes, es necesario designar un modelo de suelo no lineal, que asume el desarrollo de deformaciones plásticas y se define en base a los parámetros de resistencia de los suelos correspondiente a la cohesión y ángulo de fricción interna.

Figura 37

Parámetros geotécnicos de los suelos

Suelo 01.	
Material model :	Drucker - Prager
Unit weight :	$\gamma = 24.00 \text{ KN/m}^3$
Poisson's ratio :	$\nu = 0.20$
Elastic modulus :	$E = 227.00 \text{ MPa}$
Modulus unloading / reloading :	$E_{ur} = 238.00 \text{ MPa}$
Angle of internal friction :	$\phi_{ef} = 34.00^\circ$
Cohesion of soil :	$c_{ef} = 178.00 \text{ kPa}$
Dilation angle :	$\psi = 0.00^\circ$
Saturated unit weight :	$\gamma_{sat} = 28.00 \text{ kN/m}^3$

Suelo 02.	
Material model :	Drucker - Prager
Unit weight :	$\gamma = 22.00 \text{ KN/m}^3$
Poisson's ratio :	$\nu = 0.18$
Elastic modulus :	$E = 227.00 \text{ MPa}$
Modulus unloading / reloading :	$E_{ur} = 238.00 \text{ MPa}$
Angle of internal friction :	$\phi_{ef} = 32.00^\circ$
Cohesion of soil :	$c_{ef} = 170.00 \text{ kPa}$
Dilation angle :	$\psi = 0.00^\circ$
Saturated unit weight :	$\gamma_{sat} = 28.00 \text{ kN/m}^3$

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, para concluir el proceso de configuración de la topografía consiste en la generación de la malla de elementos finitos. Es así que la densidad de la malla influye significativamente para la determinación del grado de estabilidad resultante (factor de seguridad), por ese motivo, es imperativo elegir una malla suficientemente fina. Por eso se elige la longitud del borde del elemento de 1,5 m para generar la malla mostrándose estos resultados en la Figura N° 36c, se muestra el resultado gráfico del proceso de asignación de la malla finita.

- 1) Etapa de construcción 1: consiste en el análisis del factor de seguridad del talud original sin el efecto de la carga en franja. Manteniendo la configuración del análisis en estándar.

Figura 38

Parámetros de los suelos y rocas



Nota. Tomado de la configuración del software Geo5 Versión 2022.

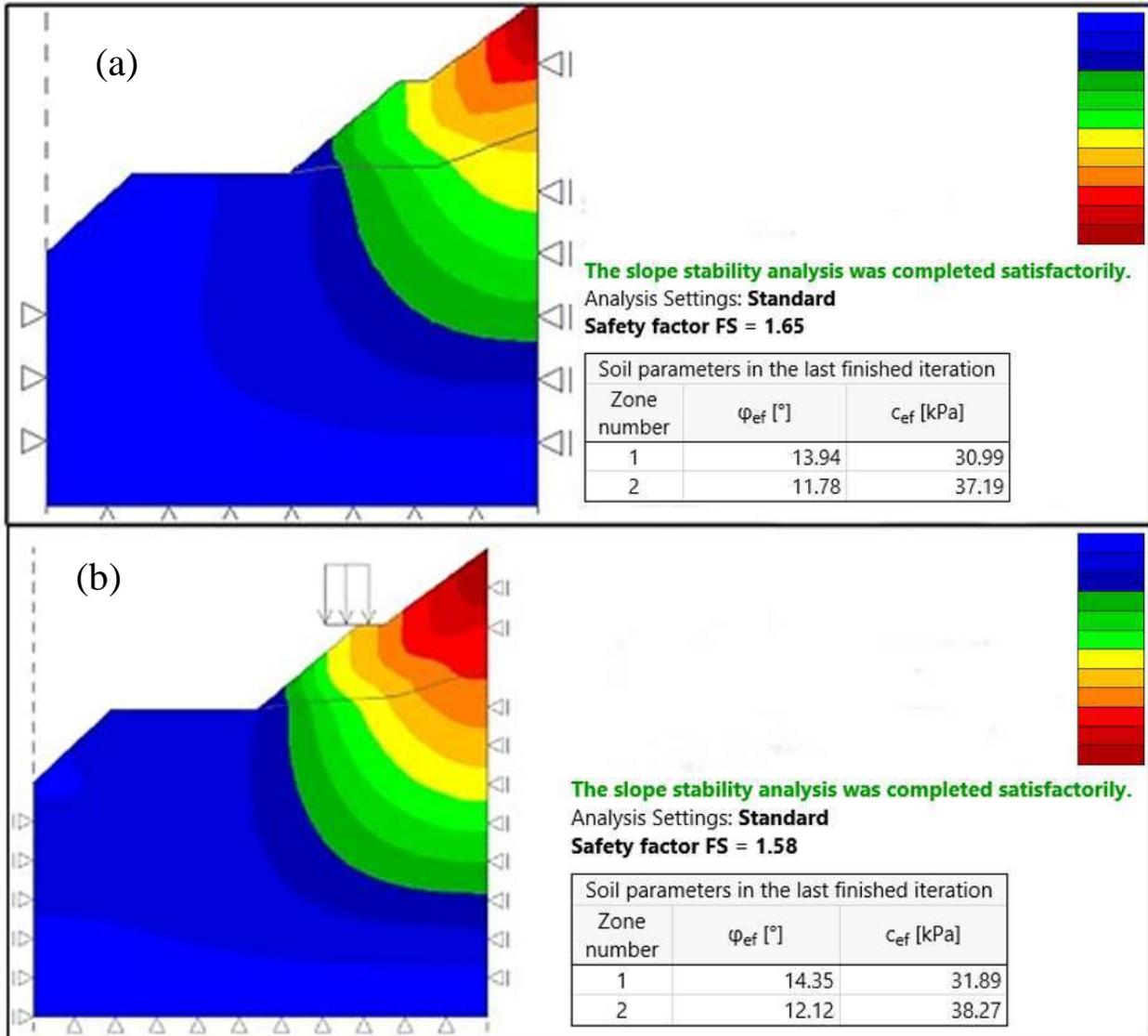
El análisis de estabilidad del talud en sí está enmarcado en la reducción de los parámetros relacionados con la resistencia del suelo, tanto la cohesión c , como el ángulo de fricción interna ϕ . El factor de seguridad se define en el contexto de este método como un parámetro que se aplicará a razón de disminuir los valores reales de los parámetros c , ϕ , lo que lleva a una pérdida de estabilidad. El grado de estabilidad del talud se determina en el programa a través la relación:

$$FS = \tan\phi_s / \tan\phi_p.$$

Donde: ϕ_s es el valor real del ángulo de fricción interna, ϕ_p , es el valor del ángulo de fricción interna en el momento de la falla. Uno de los resultados muy útiles para los análisis de estabilidad es la gráfica de los vectores de desplazamiento y la deformación plástica equivalente. En las deformaciones plásticas se detalla la forma y magnitud de la superficie de falla potencial.

Figura 39

Cuadro de análisis y cálculo del factor de seguridad (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m²



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

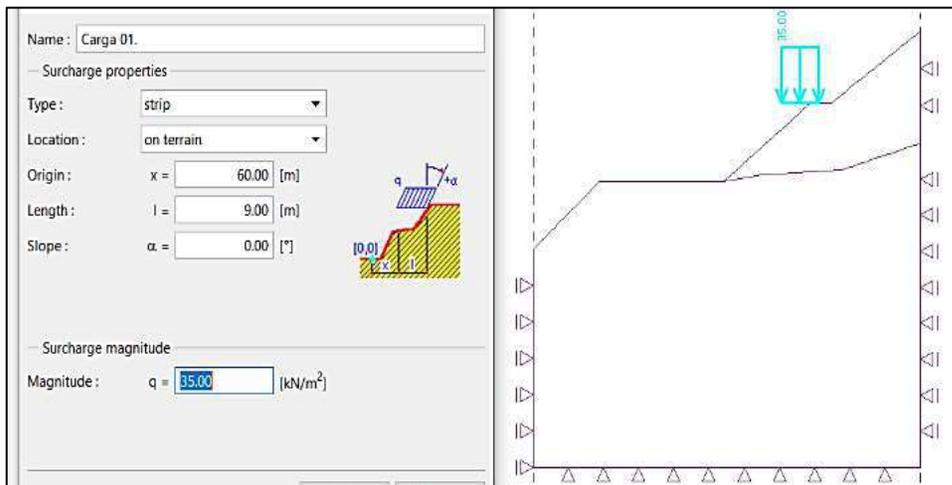
El programa en modo "Estabilidad" permite trazar los desplazamientos en las direcciones (Z y X) y las deformaciones (totales o plásticas). La deformación de la estructura pertenece al estado de análisis para parámetros reducidos del suelo, en ese contexto, dista de la deformación

real: logrando una sola imagen de todo el comportamiento del talud o de la estructura en el momento de la falla.

- 2) Etapa de construcción 2: consiste en el análisis del factor de seguridad del talud bajo el efecto de sobrecarga de la franja, que consiste en la adición del recargo en la pendiente. Primero se configura el cuadro "Recargo" definiendo las características y la magnitud del recargo, de acuerdo con la Figura N° 40.

Figura 40

Configuración de la sobrecarga en el talud



Nota. Elaboración propia.

Con esta configuración se analiza la deformación plástica que se genera producto de la adición de sobrecarga de 35 kN/m² sobre el talud, resultando un factor de seguridad aceptable al resultado del análisis sin sobrecarga. Este resultado se puede ver en la Figura N° 36.

- 3) Etapa de construcción 3: consiste en la estabilización de taludes con la inserción de anclajes para el posterior análisis de la estabilidad. Para configurar el anclaje se tiene que ingresar los parámetros del anclaje, pendiente del anclaje, diámetro de anclaje, y la distancia entre anclajes.

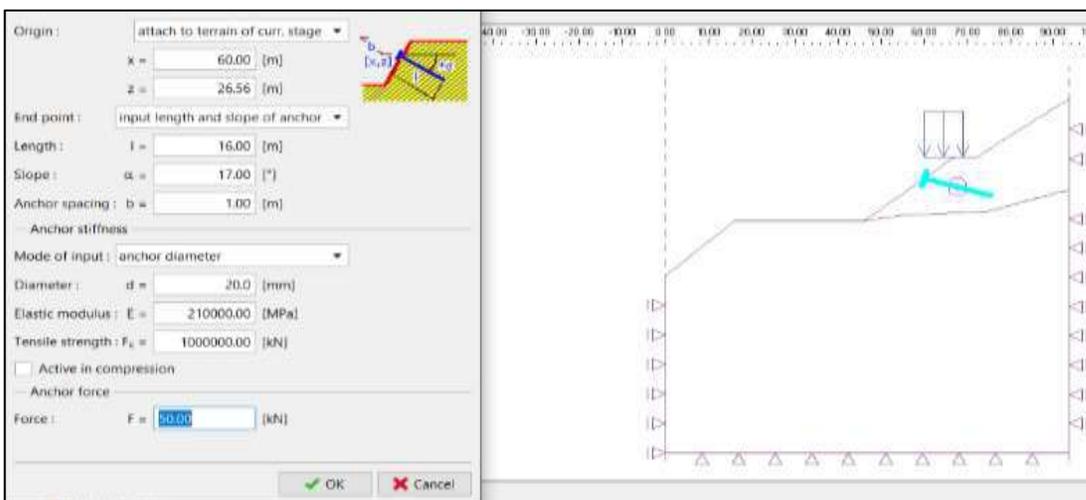
Donde estabilización de taludes con anclajes, para este análisis se agrega la etapa de construcción 3. Posteriormente se presiona el botón "Agregar" en el marco "Anclajes" y en la etapa de construcción se establece un anclaje de acero con la fuerza de pretensado $F = 50 \text{ kN}$ en la ventana de diálogo "Nuevos anclajes". Se considera estos parámetros de anclaje:

- Longitud del anclaje: $l = 16 \text{ m}$
- Pendiente del anclaje: $\alpha = 17^\circ$
- Diámetro del anclaje: $d = 20 \text{ mm}$
- Distancia entre anclajes: $b = 1 \text{ m}$

A continuación, se muestra la configuración de anclaje del talud.

Figura 41

Configuración de anclaje del talud

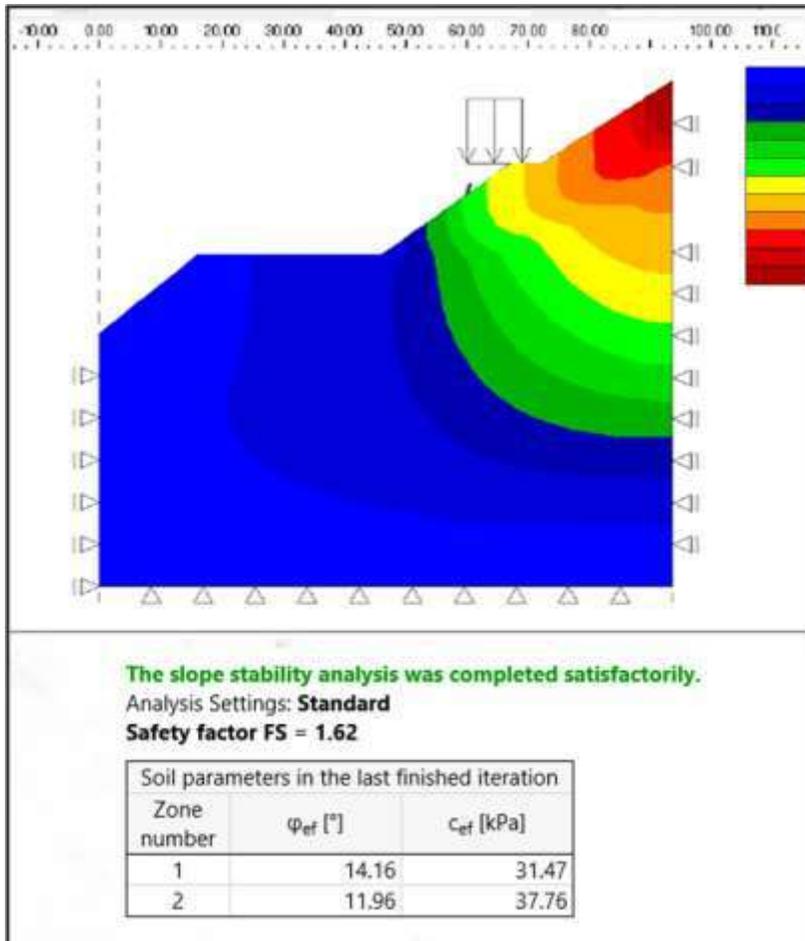


Nota. Elaboración propia.

El anclaje mostrado se analiza como carga inducida por la fuerza porque actúa en la cabeza del anclaje; Por eso, la rigidez del anclaje genera cierto efecto sobre la estabilidad.

Figura 42

Resultado del análisis de la estabilidad del talud con anclaje de seguridad



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

Esta etapa concluye con la obtención del factor de seguridad, los cuales se registran para caracterizar el grado de estabilidad del talud.

Por otro lado, la verificación de la forma de la superficie de deslizamiento es muy importante en algunos casos, porque puede ocurrir una falla local de la estructura incluso en áreas diferentes a las esperadas.

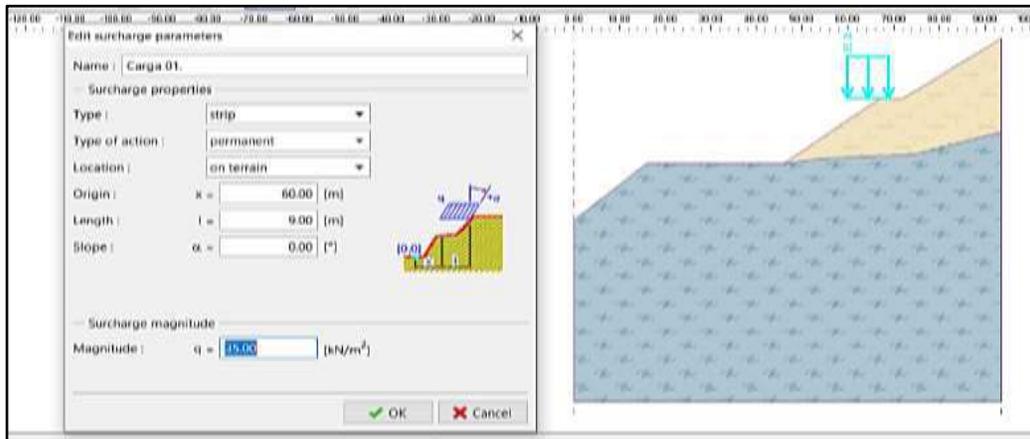
En la Figura N° 42, se puede observar la evolución de la zona plástica localizada del suelo en las proximidades de la cabeza del anclaje durante el transcurso del análisis con la densidad de malla de 1,5 m para el modelo Drucker-Prager.

4.5. Procedimiento para el análisis de la estabilidad de taludes con métodos tradicionales

En esta sección referimos con otros métodos a la aplicación de métodos como: Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Janbú, y Morgenstem - Price, para determinar la estabilidad del talud. El análisis se inicia realizando el diseño y construcción del talud con los parámetros definidos en la sección 4.4. Una vez definida las capas y subcapa, la composición de los suelos y rocas, el siguiente paso, consiste en definir un recargo de franja, el cual se considera permanente con su ubicación en la parte superior del talud tal como se consideró en el análisis por elementos finitos de la sección 4.5.

Figura 43

Configuración de la carga sobre la franja para el análisis con otros métodos



Nota. Elaboración propia.

El recargo es ingresado a 1 metro del ancho del talud. Con excepción del recargo concentrado, en el cual el programa hace un cálculo del efecto de la carga sobre el perfil analizado.

Cabe aclarar que en este análisis se omite la presencia de “Terraplén”, “Corte de tierra”, “Anclajes”, “Clavos”, “Pilotes antideslizantes”, “Refuerzos” y “Agua”. El cuadro “Terremoto” no incide en este análisis, ya que el talud no está en una zona sísmicamente activa, por lo que en este caso se considera una situación de diseño permanente.

Para análisis utilizando otros métodos (diferentes al MEF), es necesario definir la superficie de deslizamiento, para el que se tiene dos opciones circular y poligonal. En el presente análisis se tomará en cuenta las dos opciones para observar la variabilidad de los resultados.

Análisis 1 – superficie de deslizamiento circular

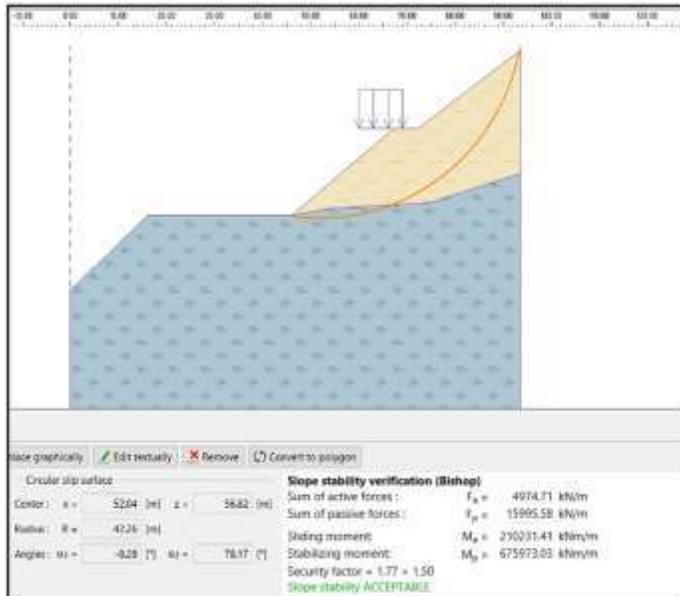
La superficie deslizante circular se ingresa en el software el deslizamiento inicial usando las coordenadas del centro (x, y) y su radio usando el puntero haciendo clic en la interfaz para ingresar tres puntos por los cuales pasa la superficie de deslizamiento.

En el caso de las superficies de deslizamiento rotacional ocurren con mayor frecuencia en suelos cohesivos, Estos se modelan utilizando superficies de deslizamiento circulares. Esta superficie es usada para encontrar las áreas críticas de un talud analizado.

Después de ingresar la superficie de deslizamiento inicial, en primera instancia se elegirá el método Bishop como método de análisis. Los resultados del análisis – Bishop de la superficie de deslizamiento circular se muestra en la Figura N° 44.

Figura 44

Resultado del análisis Bishop



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

La evaluación de toda la pendiente se realiza considerando el deslizamiento circular, el cual es muy confiable.

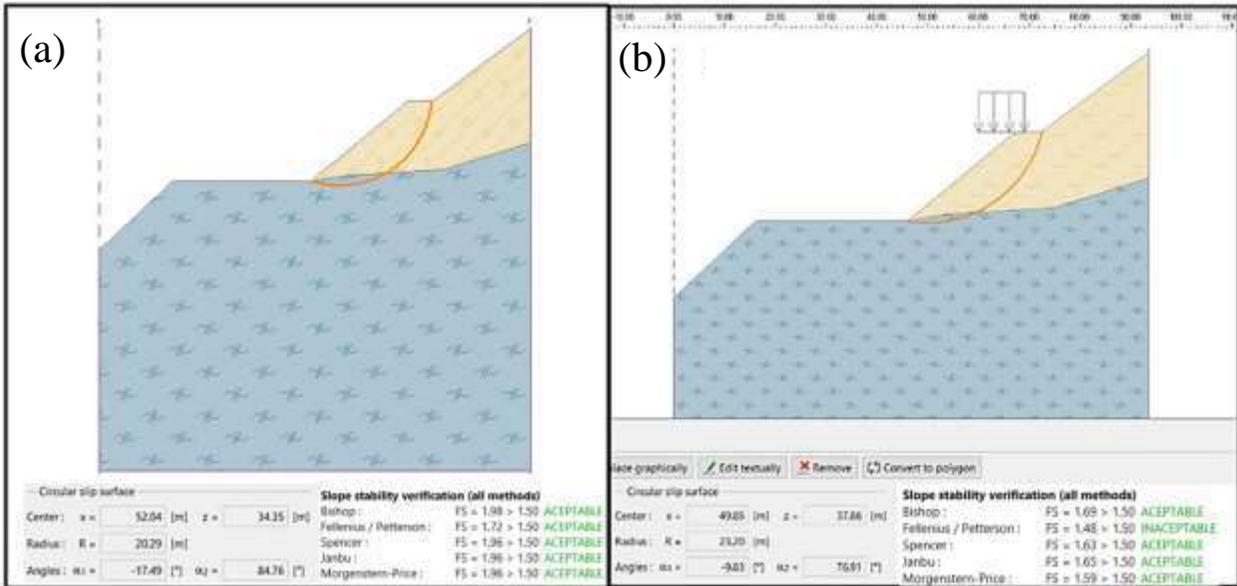
El nivel de estabilidad definido para la superficie de deslizamiento crítica mediante el método de evaluación “Bishop” es satisfactorio ($FS = 1.77 > FS = 1.50$).

Análisis 2: Análisis de la estabilidad de taludes en conjunto (con todos los métodos)

Este segundo análisis consiste llevar a cabo el tipo de análisis a "Estándar" y para el que se considera todos los métodos disponibles en el Geo5 Versión 2022.

Figura 45

Resultado del análisis con todos los métodos con tipo de análisis estándar (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m²



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

Al utilizar este procedimiento (referido al estándar), la superficie de deslizamiento calculada es la misma para todos los métodos, que viene hacer la superficie de deslizamiento crítico, el mismo que se utilizó en el análisis anterior (con el método de Bishop).

Por otro lado, el uso del método de análisis es de acuerdo con la experiencia del analista. Los métodos más populares son los métodos de rodajas y/o rebanadas, pero el más utilizado es el método Bishop, ya que proporciona resultados conservadores.

En caso de taludes reforzados o anclados, son razonables otros métodos rigurosos (Janbú, Spencer y Morgenstern-Price). Los cuales son más rigurosos, cumpliendo así todas las condiciones de equilibrio y describiendo mucho mejor el comportamiento real de la pendiente.

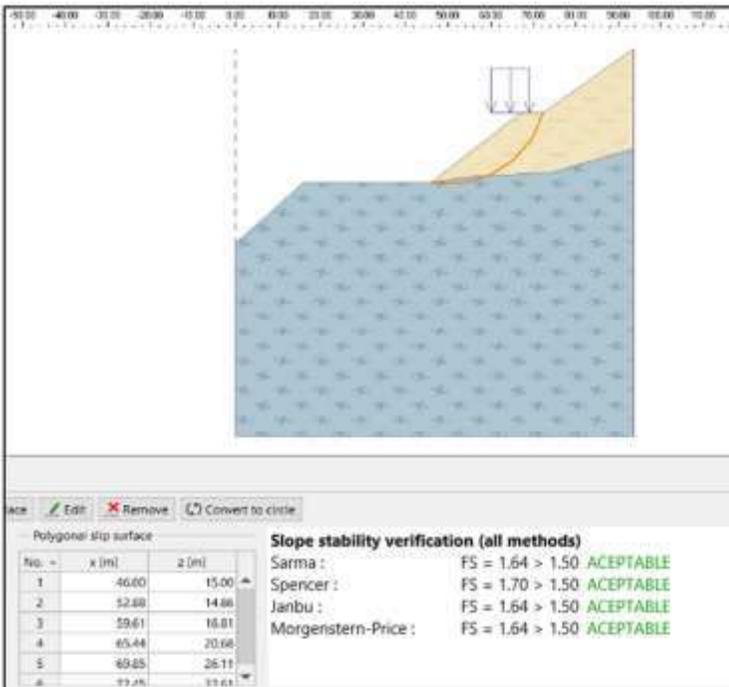
Análisis 3 – superficie de deslizamiento poligonal

En este paso, se redefine la superficie de deslizamiento circular original a una superficie de deslizamiento poligonal usando la opción de convertir a polígono disponible en el software. Para este caso ya que es un polígono se debe ingresar el número de segmentos del polígono el cual se considera, en este caso.

Como método de análisis se considera todos los métodos disponibles, como tipo de análisis se selecciona “optimización” y se realiza el análisis.

Figura 46

Análisis de la estabilidad del talud con superficie deslizante poligonal



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

Los valores del nivel de estabilidad del talud para la superficie de deslizamiento poligonal son satisfactorios ($FS = 1.64 > FS = 1.50$).

Es más eficiente ingresar la superficie de deslizamiento poligonal inicial con una forma similar y colocarla como una superficie de deslizamiento circular.

4.6. Comparación de métodos de análisis en estabilidad de taludes.

En la parte anterior se mostró el procedimiento para definir la estabilidad de taludes con el MEF y los métodos tradicionales, como el método Bishop, Fellenius/Petterson, Spencer, Janbú y Morgenstern - Price. En esta sección se resume todo el procedimiento para un talud con tres capas (tres tipos de suelos diferentes), esto con el propósito de evaluar la eficiencia del método de elementos finitos en relación a los métodos tradicionales.

En ese marco, en el análisis se presenta las características de los suelos en la Figura N° 47, donde se muestra las características geotécnicas de los suelos a analizar.

Figura 47

Características geotécnicas de los suelos y rocas

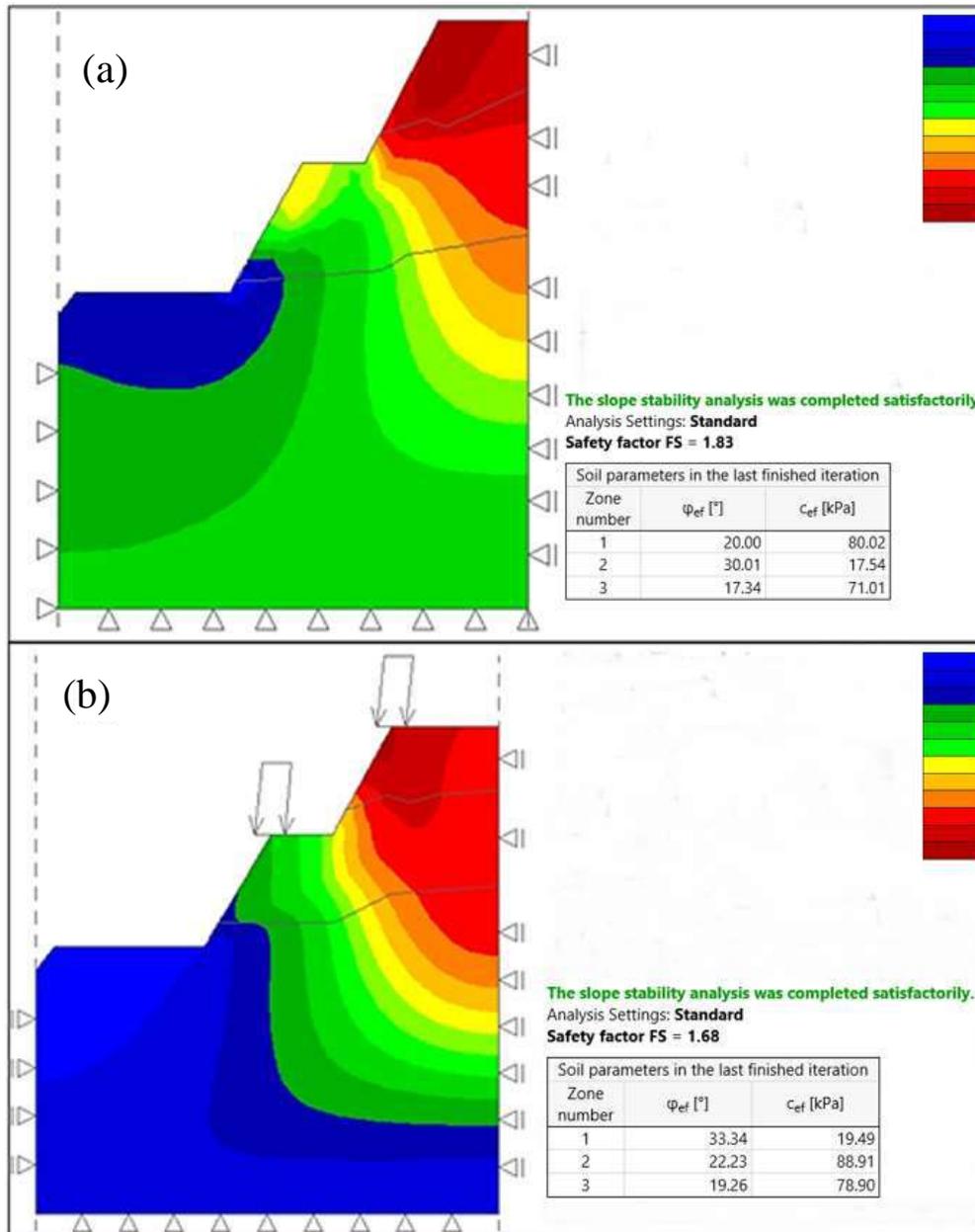
<p>Suelo 01.</p> <p>Material model : Drucker - Prager</p> <p>Unit weight : $\gamma = 38.68 \text{ KN/m}^3$</p> <p>Poisson's ratio : $\nu = 0.20$</p> <p>Elastic modulus : $E = 302.00 \text{ MPa}$</p> <p>Modulus unloading / reloading : $E_{ur} = 396.00 \text{ MPa}$</p> <p>Angle of internal friction : $\phi_{ef} = 46.00^\circ$</p> <p>Cohesion of soil : $c_{ef} = 176.00 \text{ kPa}$</p> <p>Dilation angle : $\psi = 0.00^\circ$</p> <p>Saturated unit weight : $\gamma_{sat} = 28.00 \text{ kN/m}^3$</p>	
<p>Suelo 02.</p> <p>Material model : Drucker - Prager</p> <p>Unit weight : $\gamma = 27.00 \text{ KN/m}^3$</p> <p>Poisson's ratio : $\nu = 0.19$</p> <p>Elastic modulus : $E = 302.00 \text{ MPa}$</p> <p>Modulus unloading / reloading : $E_{ur} = 397.00 \text{ MPa}$</p> <p>Angle of internal friction : $\phi_{ef} = 42.00^\circ$</p> <p>Cohesion of soil : $c_{ef} = 173.00 \text{ kPa}$</p> <p>Dilation angle : $\psi = 0.00^\circ$</p> <p>Saturated unit weight : $\gamma_{sat} = 40.00 \text{ kN/m}^3$</p>	
<p>Suelo 03.</p> <p>Material model : Drucker - Prager</p> <p>Unit weight : $\gamma = 41.65 \text{ KN/m}^3$</p> <p>Poisson's ratio : $\nu = 0.20$</p> <p>Elastic modulus : $E = 302.00 \text{ MPa}$</p> <p>Modulus unloading / reloading : $E_{ur} = 397.00 \text{ MPa}$</p> <p>Angle of internal friction : $\phi_{ef} = 42.00^\circ$</p> <p>Cohesion of soil : $c_{ef} = 173.00 \text{ kPa}$</p> <p>Dilation angle : $\psi = 0.00^\circ$</p> <p>Saturated unit weight : $\gamma_{sat} = 40.00 \text{ kN/m}^3$</p>	

Nota. Elaboración propia.

(a) Análisis de Estabilidad con el método de elementos finitos.

Figura 48

Resultados del análisis de estabilidad con el MEF - tres capas de suelo (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m²

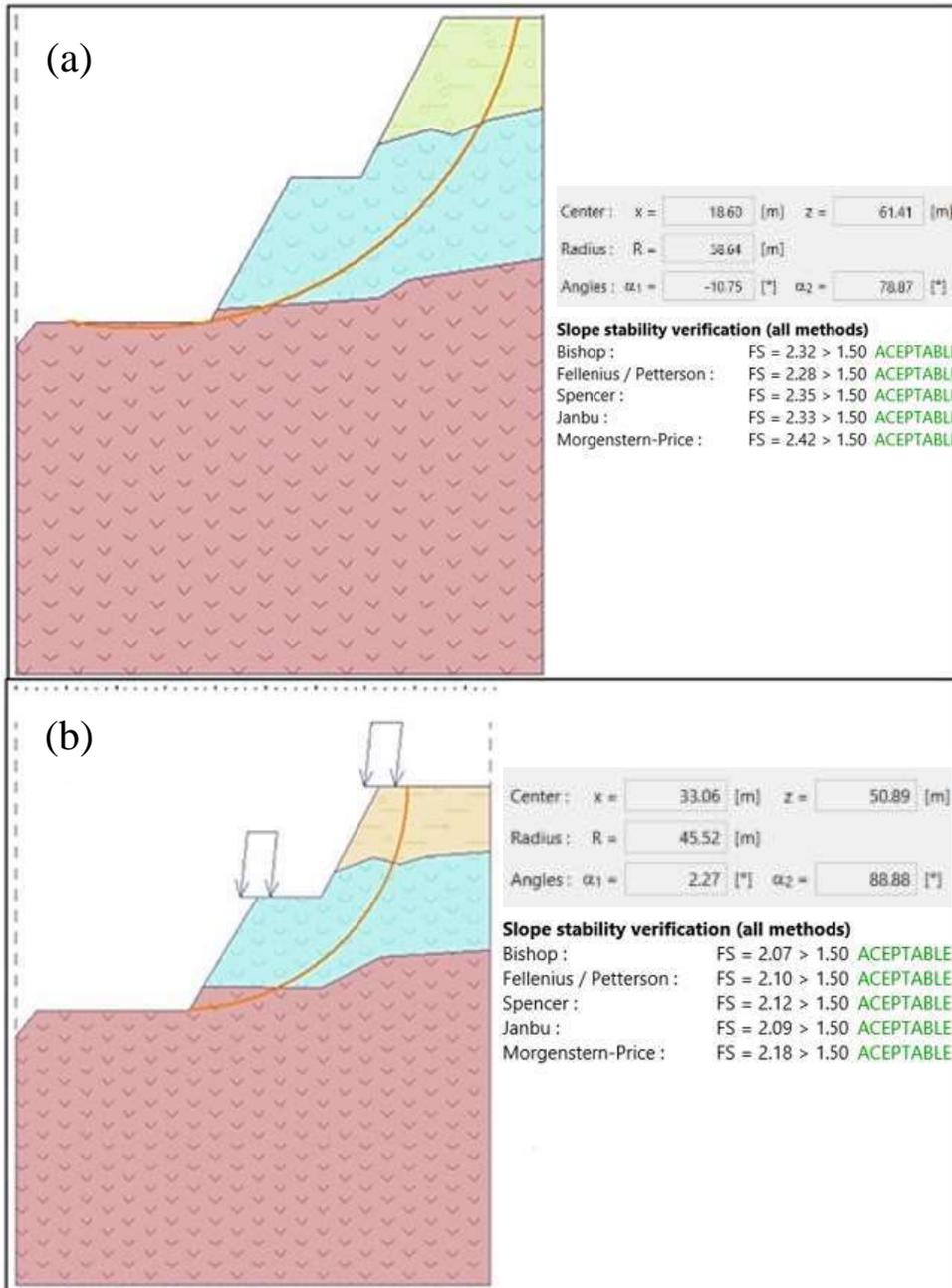


Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

(b) Estabilidad con los métodos tradicionales.

Figura 49

Resultados del análisis de estabilidad con otros métodos - tres capas de suelo (a) en condiciones naturales y (b) aplicando carga de 35 kN/m²



Nota. Resultados del F.S. analizados con el software Geo5 Versión 2022.

Las características de los suelos, en este análisis de estabilidad, son: grava, caliza y arenisca, Hasta aquí se mostró el procedimiento metodológico para el estudio en general del factor de seguridad respecto a los parámetros mostrados en la tabla 10. Ahora en lo siguiente se realizará un análisis más exhaustivo llevando a cabo el análisis para la mayor cantidad posible de taludes para poder probar la hipótesis mediante el uso de herramientas estadísticas como análisis de correlación matriz de confusión y gráficos de la variación del factor de seguridad respecto a la variación de los parámetros independientes como cohesión, ángulo de fricción interna, etc. (los mismos que se muestran en la tabla 13).

4.6.1. Predicción de la estabilidad de taludes con elementos finitos.

Sobre el conjunto de datos recopilados se tiene los resultados de la predicción (o estimación) del factor de seguridad de los taludes del tajo sur. Con el método de elementos finitos el resultado del análisis y la obtención del factor de seguridad se muestra en la tabla 13. De todo el conjunto de datos se conservó tipos de suelos como grava, caliza y arenisca. La base de datos contienen parámetros como peso unitario, módulo elástico peso unitario saturado, modulo de carga y descarga, ángulo de fricción interna, cohesión del suelo y ángulo de dilatación, los valores de cada una de los parámetros se tiene incidencia en el factor de seguridad del talud. Según la literatura los valores del factor de seguridad mayores a 1.5 indican un talud seguro y que no presenta riesgo al deslizamiento y se representa con valor de “0” estabilidad del talud, mientras que valores del factor de seguridad menores o iguales a 1.5 indica la ocurrencia de deslizamiento del talud, en la tabla se representa con valor de “1” correspondiente a la estabilidad del talud.

Tabla 13*Determinación del factor de seguridad con el método de elementos finitos (MEF)*

Tipo de Suelo/Roca	Peso Unitario	Módulo Elástico	Ratio de Poisson	Peso Unitario Saturado	Módulo de Carga y descarga	Ángulo de fricción interna	Cohesión del Suelo	Ángulo de dilatación	FS	Predicción	Estado
limo gravoso	20	25	0.2	26	28	45	95	0.01	3.87	0	0
caliza	28	250	0.1	30	280	50	145	0.01	3.87	0	0
rocas de arenisca	41	320	0.2	48	330	44	138	0.00	3.78	0	0
rocas de arenisca	27	277	0.3	31	284	41	148	0.00	1.83	0	0
rocas de grava, caliza y arenisca	38.68, 27,41.65	302	0.2	37	397	46,42, 42	176,173, 173	0.00	1.83	0	0
rocas de arenisca	20	115	0.2	22	165	25	57	0.00	1.41	1	1
rocas de arenisca-caliza	23	225	0.21	24	237	34	170	0.00	1.71	0	0
rocas de arenisca	21	217	0.2	25	246	37	75	0.11	1.46	1	1
rocas de arenisca	22	219	0.2	23	233	31	79	0.09	1.44	1	1
rocas de arenisca - caliza	26	215	0.13	19	234	38	91	0.02	1.50	0	0
limo gravoso y arenisca	24,22	227	0.19	28	238	34,32	178,170	0.01	1.65	0	1
rocas de arenisca	20	223	0.2	22	230	32	170	0.00	1.63	0	0
rocas de arenisca - caliza	27	277	0.35	31	283	73	155	1.70	3.73	0	0
rocas de arenisca	41	115	0.22	41	137	73	93	0.50	3.19	0	0
rocas de arenisca	53	193	0.47	63	213	67	112	0.97	2.87	0	0
rocas de arenisca	48	112	0.05	50	118	72	171	0.14	2.79	0	0

Nota. Elaboración propia.

4.6.2. Predicción de la estabilidad de taludes con métodos tradicionales.

Con el método de elementos finitos, es necesario comparar los resultados de la determinación del FS con resultados de análisis de la estabilidad con metodos tradicionales, que corresponden a los métodos de Bishop, Fellenius/Peterson, Spencer, Janbú, Morgestrn Price. Estos métodos solo utilizan parámetros como Peso unitario, ángulo de fricción interna, cohesión del suelo y peso unitario saturado. Como información adicional todo estos métodos utilizan el método de morh coulomb con variación de sus parámetros con el objetivo de hallar el factor de seguridad. Se detalla los resultados obtenidos del factor de seguridad en la tabla 13 y tabla 14.

El modelo referente al metodo de elementos finitos predice la ocurrencia del evento(siendo un evento la ocurrencia del deslizamiento), en condiciones naturales de operación (esto se refiere a que no se considera la preseca de sismos). y tambien el modelo predictivo esta sujeto en función al tipo de suelo existente en la zona tajo sur. Los tipos de suelos analizados se muestra en la tabla 2. Eso quiere decir la capacidad predictiva obtenida en la presente investigación esta sujeto a las condiciones del tipo de suelo o roca y la no existencia de sismos.

Tabla 14*Cálculo del factor de seguridad utilizando métodos tradicionales*

Tipo de Suelo/Roca	Peso Unitario	Ángulo de fricción interna	Cohesión del Suelo	Peso Unitario Saturado	Factor de Seguridad (FS)					Predicción	Estado
					Bishop	Fellenius/Pterson	Spencer	Janbú	Morgenstern - Price		
limo gravoso	20	45	95	26	3.91	3.73	3.89	3.88	3.88	0	0
caliza	28	50	145	30	3.91	3.73	3.89	3.88	3.88	0	0
rocas de arenisca	41	44	138	48	3.91	3.73	3.89	3.88	3.88	0	0
rocas de arenisca	27	41	148	31	2.32	2.28	2.35	2.33	2.42	0	0
rocas de grava, caliza y arenisca	38,68,27,41,65	46,42,42	176,173,173	37	2.32	2.28	2.35	2.33	2.42	0	0
rocas de arenisca	20	25	57	22	1.57	1.44	1.56	1.57	1.57	0	1
rocas de arenisca - caliza	23	34	170	24	1.68	1.50	1.67	1.67	1.67	0	0
rocas de arenisca	21	37	75	25	2.02	1.80	2.02	2.04	2.04	0	1
rocas de arenisca	22	31	79	23	1.77	1.59	1.76	1.78	1.78	0	1
rocas de arenisca - caliza	26	38	91	19	1.73	1.57	1.73	1.73	1.73	0	0
Limo gravoso y arenisca	24,22	34,32	178,170	28	1.98	1.72	1.96	1.96	1.96	0	1
rocas de arenisca	20	32	170	22	3.97	4.38	5.28	5.31	5.31	0	0
rocas de arenisca - caliza	27	73	155	31	3.66	5.37	6.35	6.40	6.40	0	0
rocas de arenisca	41	73	93	41	3.88	5.86	7.13	7.17	7.17	0	0
rocas de arenisca	53	67	112	63	3.97	4.38	5.28	5.31	5.31	0	0
rocas de arenisca	48	72	171	50	4.42	6.19	7.54	7.59	7.59	0	0

Nota. Elaboración propia.**4.6.3. Análisis de correlación entre los parámetros.**

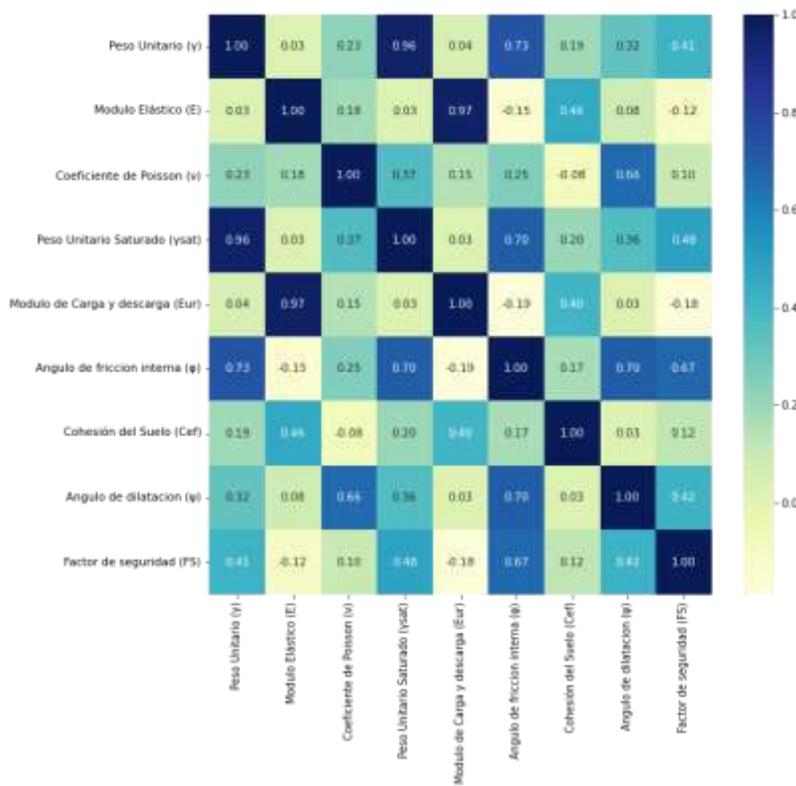
Un análisis que permite alcanzar uno de los objetivos específicos es el análisis de correlación ya que existe una influencia de los parámetros en el factor de seguridad. La cuantificación del

grado de influencia se muestra en la matriz de correlación de la Figura N° 50. En general se ve el coeficiente de correlación obtenido entre cada variable.

El coeficiente de correlación más alto obtenido de este análisis se muestra y se relaciona al módulo elástico con módulo de carga y descarga, que es de 0.97, seguido de la correlación existente entre el peso unitario y el peso unitario saturado que es de 0.96, el peso unitario saturado con el ángulo de fricción interna tiene una correlación de 0.70, el ángulo de fricción interna y el peso unitario tiene una correlación de 0.73, el ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatación tienen una correlación de 0.70 y el ángulo de fricción interna y el factor de seguridad tiene una correlación de 0.67.

Figura 50

Análisis de correlación



Nota. Gráfico de análisis de correlación con el uso del programa Python.

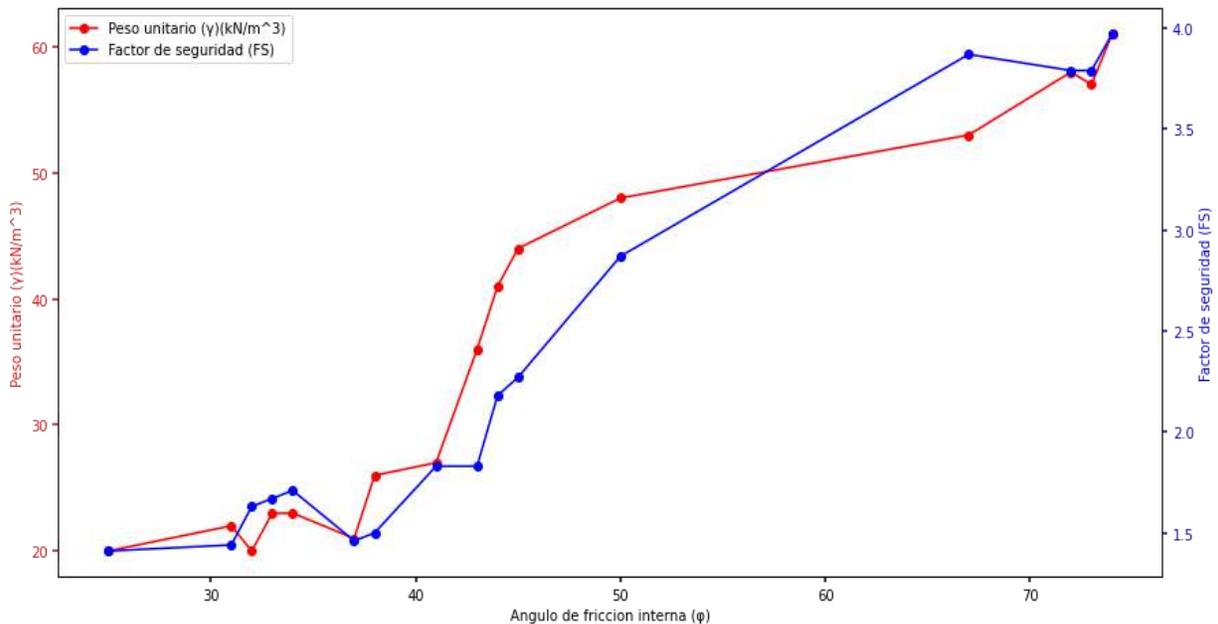
Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Relación del peso unitario y factor de seguridad respecto al ángulo de fricción interna.

Las correlaciones mostradas en la Figura N° 50. Permite justificar la relación que puede existir entre el ángulo de fricción interna tanto como con el peso unitario y el factor de seguridad. El comportamiento de las variaciones se puede mostrar en la Figura N° 51. En donde se representa en el lado izquierdo del gráfico el peso unitario en función al ángulo de fricción interna (curva de color rojo) y en el lado derecho el factor de seguridad en función del ángulo de fricción interna (curva de color azul), ambas curvas muestran un comportamiento creciente respecto a la variación ascendente del ángulo de fricción interna.

Figura 51

Relación del ángulo de fricción interna el peso unitario y el factor de seguridad



Nota. Gráfico de la incidencia entre él ϕ_{ef} , γ y F.S con el uso del programa Python.

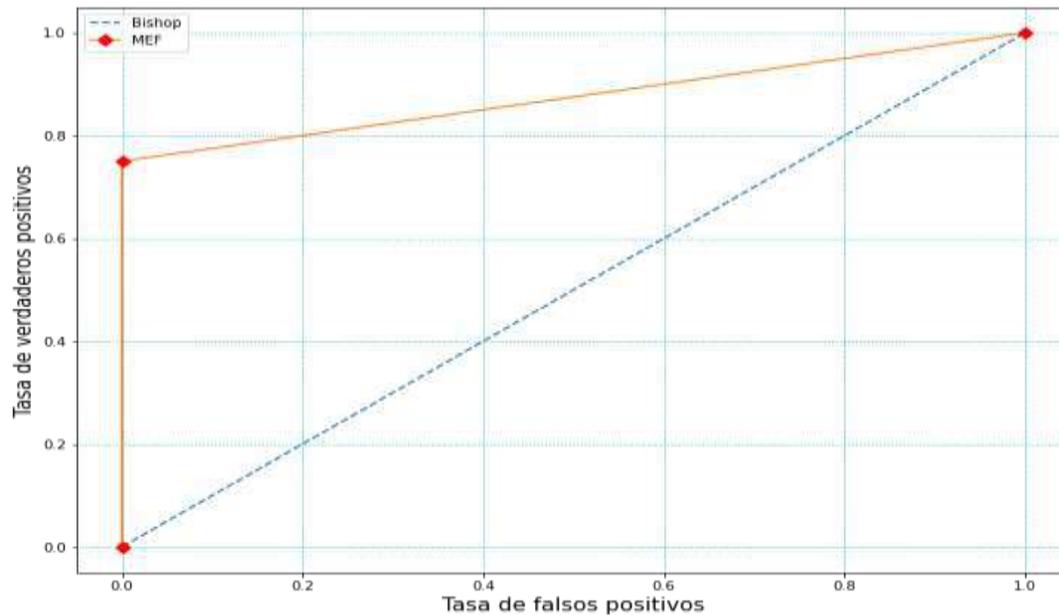
Fuente: Elaboración propia.

4.6.5. Cálculo de la eficiencia del MEF y los métodos tradicionales.

La tabla 13 muestra los resultados en los cuales la mayoría de casos con el MEF se acierta, siendo esto una forma de observar gráficamente la efectividad del método. Esto se consigue a través del gráfico de la característica operativa del receptor (o curva ROC, del inglés Receiver operating characteristic), el método más eficiente es la curva que se aproxima más a una escuadra de 90 grados. Por consiguiente, con el propósito de realizar una comparación gráfica entre el método de elementos finitos y el método de bishop (de forma analoga se puede realizar la comparación con los metodos tradicionales restantes). Se realizó la curva de operatividad de ambos métodos el cual se muestra en la Figura N° 52, La curva ROC es el gráfico de la tasa de verdaderos positivos en función de la tasa de falsos positivos.

Figura 52

Comparación de la curva ROC entre el MEF y el método Bishop



Nota. Gráfico de la curva ROC-AUC con el uso del programa Python.

Fuente: Elaboración propia.

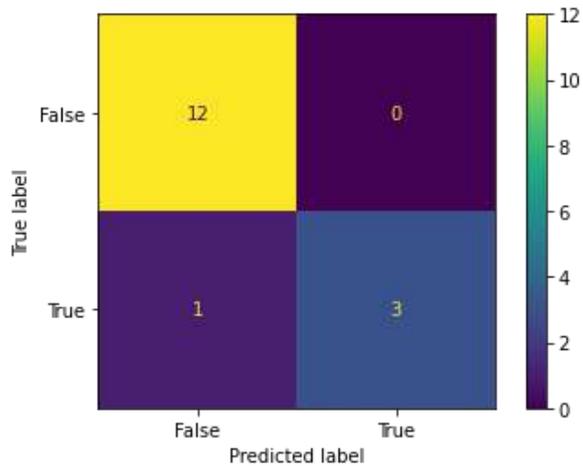
Se muestra claramente en la gráfica que el MEF es más eficiente que el método Bishop. Eso quiere decir que el método MEF predice la estabilidad del talud con mayor precisión en comparación al método Bishop.

4.6.6. Cuantificación de la precisión de los métodos a través de la matriz de confusión.

Por otro lado, para predicciones binarias donde “0” es talud estable y “1” representa la ocurrencia de deslizamiento del talud, la eficiencia del método que se utiliza para predecir cualquiera de los eventos se mide a través de la matriz de confusión, donde se cuantifica la precisión del método de elementos finitos a comparación con los métodos tradicionales.

Figura 53

Matriz de confusión para predicciones con elementos finitos

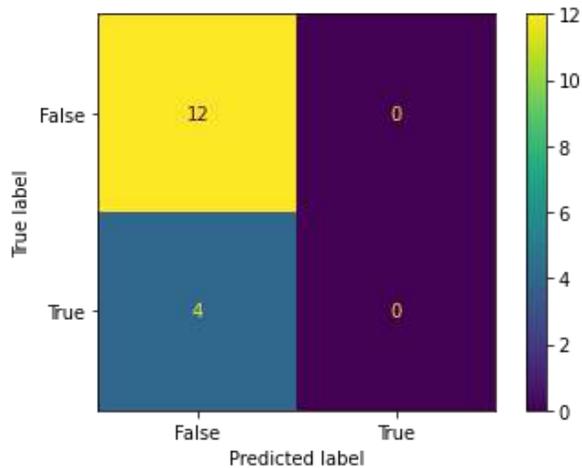


Nota. Gráfico de matriz de confusión con el uso del programa Python.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 54

Matriz de confusión de las predicciones de los métodos tradicionales



Nota. Gráfico de matriz de confusión con el uso del programa Python.

Fuente: Elaboración propia.

Para esta parte se tienen cuatro cuadrantes en la Matriz de Confusión demostrándose a continuación:

Falso Positivo (cuadrante superior derecho) (FP): El modelo predice la no ocurrencia del deslizamiento sin embargo ocurre el deslizamiento.

Verdadero Positivo (cuadrante inferior derecho) (TP): El modelo predice la ocurrencia del deslizamiento y realmente ocurre el deslizamiento.

Verdadero Negativo (cuadrante superior izquierdo) (TN): El modelo predice la ocurrencia de un deslizamiento y realmente no ocurre el deslizamiento.

Falso Negativo (cuadrante inferior izquierdo) (FN): El modelo predice la no ocurrencia del deslizamiento y realmente no ocurre el deslizamiento.

De la matriz de confusión (Figura N° 53), El método de elementos finitos predice casi correctamente. Es decir que el MEF solo se equivoca en una de sus predicciones, ello se muestra en la tasa de verdadero negativo al afirmar que un deslizamiento ocurrirá en cierto talud, cuando

realmente no ocurre. En cuanto a la tasa de verdadero positivo el MEF predice 3 eventos de deslizamiento correctamente. Respecto a la tasa de falso negativo El MEF predice 12 taludes en los que no ocurre deslizamiento. Finalmente la tasa de falso positivo el MEF no se equivoca, al indicar que en un talud no ocurrirá un deslizamiento cuando en realidad ocurre el deslizamiento del talud.

Respecto a los resultados de la matriz de confusión de las predicciones con los métodos tradicionales, se puede observar que en la tasa de falsos negativos en los métodos tradicionales indican la no ocurrencia de un deslizamiento cuando en realidad tampoco ocurre el deslizamiento (quiere decir que no se equivocó), con respecto a los verdaderos negativos, los métodos tradicionales predicen cero eventos de deslizamiento y en realidad ocurren 4 eventos de deslizamiento, respecto al falso positivo los métodos tradicionales indican que ningún talud experimenta deslizamiento cuando en realidad no ocurre y con respecto a los verdaderos positivos los métodos tradicionales tienen una tasa de confusión cero.

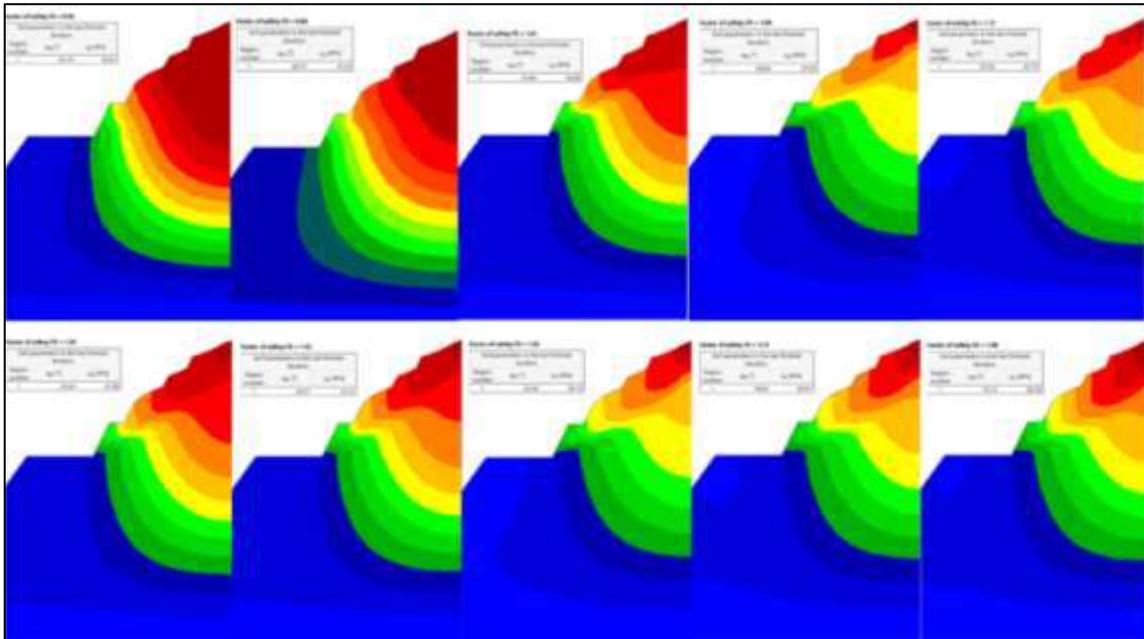
En resumen el MEF se equivoca una vez, mientras que los métodos tradicionales se equivocan en la predicción en un total de 4 taludes.

4.6.7. Influencia de la variación de la cohesión en el factor de seguridad.

A continuación se muestra gráficamente la evolución de la estabilidad del talud respecto a la variación del coeficiente de cohesión del suelo, en donde el color azul indica la región de alta estabilidad. El degradado pasa por amarillo el cual indica estabilidad media y rojo indica la región altamente inestable y que ocurrirá un deslizamiento (ver la Figura N° 55). En el mapa de colores se detalla como poco a poco el valor de la cohesión aumenta, también se incrementa la región de estabilidad media y disminuye la región sombreada con rojo (lo que indica que disminuye la región de inestabilidad tornándose de color verde amarillo).

Figura 55

Mapa de colores de la evolución del factor de seguridad respecto a la variación de la cohesión



Nota. Gráfico de la variación de la cf analizados con el software Geo5 Versión 2022.

Fuente: Elaboración propia.

La cuantificación de los resultados de la evolución del factor de seguridad de los taludes al variar la cohesión se muestran en la tabla 15. Se muestra una comparación de dicha evolución entre los métodos tradicionales y el método de elementos finitos.

Tabla 15*Resultados de la evolución del factor de seguridad y la cohesión para todos los métodos*

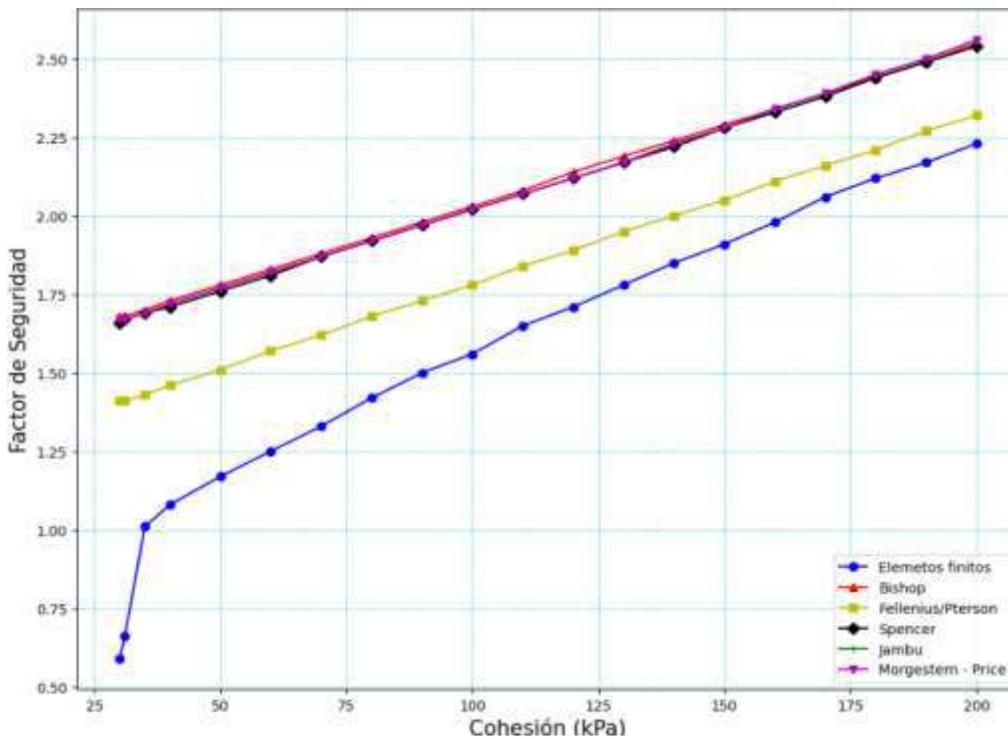
Cohesión	Factor de seguridad					
	Bishop	Fellenius/Peterson	Spencer	Janbú	Morgenstern - Price	MEF
30	1.68	1.41	1.66	1.67	1.67	0.59
31	1.68	1.41	1.67	1.67	1.67	0.66
35	1.70	1.43	1.69	1.69	1.69	1.01
40	1.73	1.46	1.71	1.72	1.72	1.08
50	1.78	1.51	1.76	1.77	1.77	1.17
60	1.83	1.57	1.81	1.82	1.82	1.25
70	1.88	1.62	1.87	1.87	1.87	1.33
80	1.93	1.68	1.92	1.92	1.92	1.42
90	1.98	1.73	1.97	1.97	1.97	1.50
100	2.03	1.78	2.02	2.02	2.02	1.56
110	2.08	1.84	2.07	2.07	2.07	1.65
120	2.14	1.89	2.12	2.12	2.12	1.71
130	2.19	1.95	2.17	2.17	2.17	1.78
140	2.24	2.00	2.22	2.23	2.23	1.85
150	2.29	2.05	2.28	2.28	2.28	1.91
160	2.34	2.11	2.33	2.34	2.34	1.98
170	2.39	2.16	2.38	2.39	2.39	2.06
180	2.44	2.21	2.44	2.45	2.45	2.12
190	2.49	2.27	2.49	2.50	2.50	2.17
200	2.55	2.32	2.54	2.56	2.56	2.23

Nota. Elaboración propia.

A continuación es necesario observar gráficamente la relación de la variación del factor de seguridad y de la cohesión para el MEF y los métodos tradicionales en un cuadro comparativo para observar su variación, tal gráfico se observa en la Figura N° 56.

Figura 56

Gráfico del factor de seguridad en función de la variación de la cohesión



Nota. Gráfico de la relación de F.S. vs la variación de la *cef* con el uso del programa Python.

Fuente: Elaboración propia.

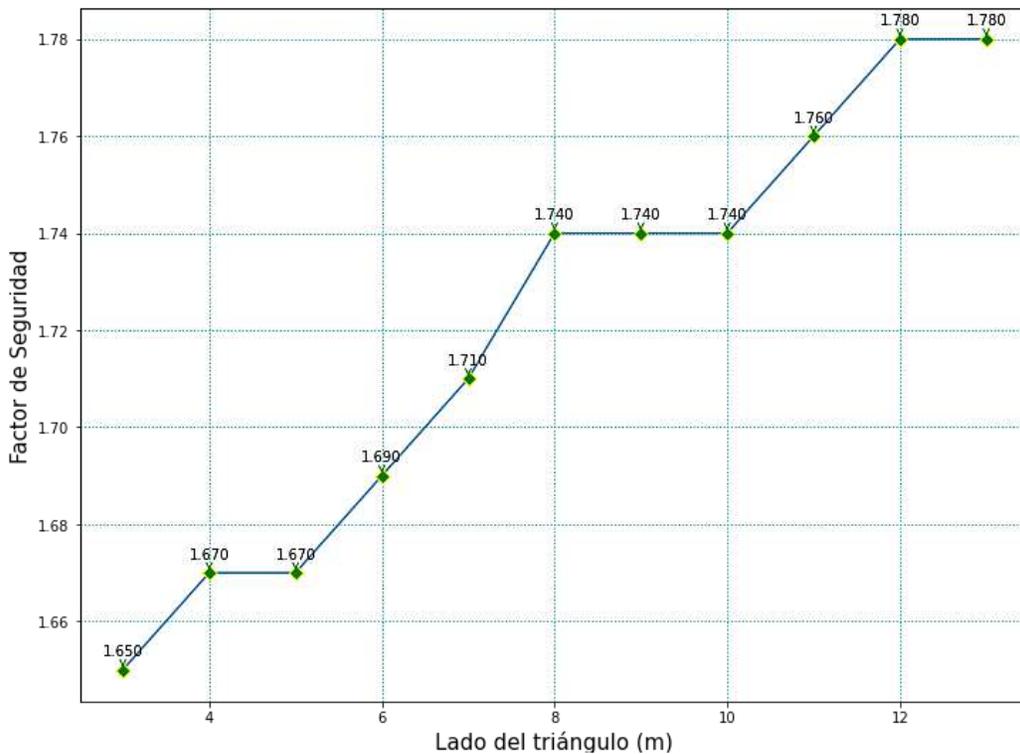
Para el factor de seguridad es importante el comportamiento de la curva en función de la cohesión que se muestra en la Figura N° 56, es el resultado de llevar a cabo simulaciones del talud compuesta por roca grava, caliza y arenisca, que son los típicos componentes de los taludes del tajo sur. Adicionalmente las características de la roca caliza y arenisca tienen un peso unitario de 20kN/m^3 , módulo elástico de 215 MPa, módulo de carga y descarga de 230 MPa, ángulo de fricción interna de 32° , cohesión de 60 kPa, ángulo de dilatación de 0° y peso unitario saturado de 22 kN/m^3 .

4.6.8. Influencia del agujero triangular del enmallado del MEF en el factor de seguridad.

Como se mencionó en la parte de diseño y modelamiento de taludes con elementos finitos, el método consiste principalmente en particionar en triángulos finitos relativo a las dimensiones de la geometría de todo el talud. El lado de los triángulos (que por cierto esos triángulos son equiláteros) finitos incide en el resultado final del cálculo del factor de seguridad. Razón por la cual se hizo una evaluación de la influencia de la longitud del lado del triángulo en el factor de seguridad, la cual es detallada en la Figura N° 57. En el gráfico se observa una tendencia creciente escalonada del FS frente a la variación del lado del triángulo.

Figura 57

Influencia del lado del triángulo infinitesimal en el cálculo del factor de seguridad



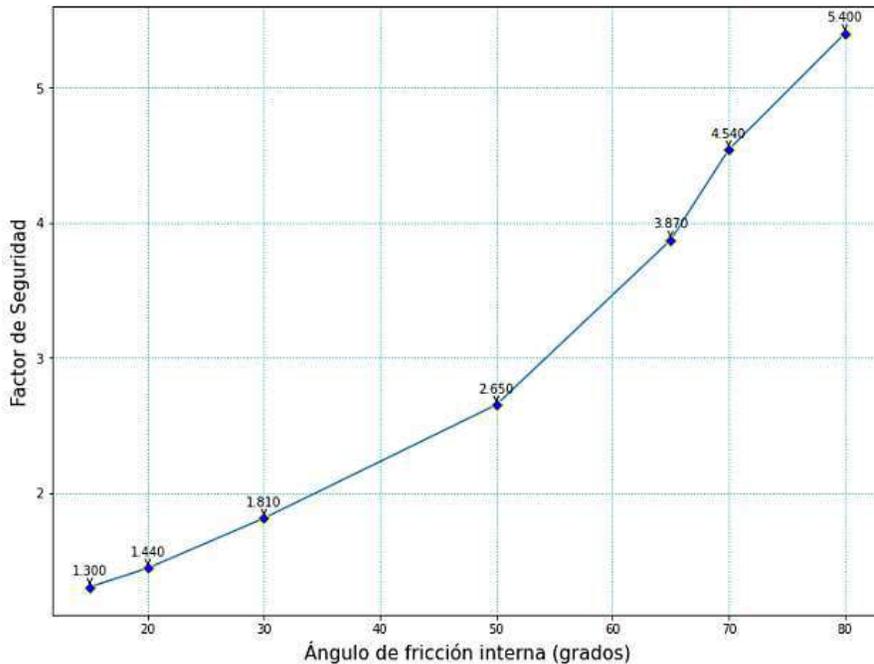
Nota. La evolución del F.S vs la variación del lado del triángulo con el uso del programa Python.
Fuente Elaboración propia.

4.6.9. Influencia de la variación del ángulo de fricción interna en el factor de seguridad.

Otro parámetro, el cual influye de manera importante en el valor del factor de seguridad, viene a ser el ángulo de fricción interna, que según la Figura N° 58, se puede ver la variación del factor de seguridad es directamente proporcional a la variación del ángulo de fricción interna. Este análisis se realizó en un talud con peso unitario de 20 kN/m^3 , módulo de elasticidad de 277 MPa , peso unitario saturado de 22 kN/m^3 , módulo de carga y descarga, 280 MPa , ángulo de fricción interna igual a 80° , cohesión de 200 kpa y ángulo de dilatación de 2° , cuya composición litológica es de roca arenisca y grava.

Figura 58

Variación del Factor de seguridad respecto al ángulo de fricción interna



Nota. La evolución del F.S vs la variación del φ_{ef} con el uso del programa Python.

Fuente Elaboración propia.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Respecto al procedimiento.

De acuerdo a los resultados en el primer talud referente a la Figura N° 48, utilizando el método de elementos finitos, es una muestra de la metodología a seguir para el cálculo en general del factor de seguridad, en primera instancia los valores de los resultados a los cuales se ha llegado se aproximan a los valores de los factores de seguridad hallados con los métodos tradicionales como se muestra en la Figura N° 49, a pesar de aplicar las mismas condiciones respecto al tipo de suelo. Sin embargo el MEF es un método más elaborado por lo que requiere valores de peso unitario, módulo de elasticidad, peso unitario saturado, módulo de carga y descarga, ángulo de fricción interna, cohesión, y ángulo de dilatación, mientras que los métodos tradicionales requieren solo los valores de los parámetros de peso unitario ángulo de fricción interna, cohesión y peso unitario saturado, tales parámetros son indispensables tanto para MEF como para los métodos tradicionales, para completar el proceso de cálculo de factor de seguridad, la cantidad de parámetros considerados en los métodos de elementos finitos y los métodos tradicionales tiene una relevancia importante para la precisión en el cálculo del factor de seguridad.

5.2. Estabilidad de taludes y parámetros influyentes en el factor de seguridad.

Tanto la tabla 13 como la tabla 14, muestran los resultados del cálculo del factor de seguridad. Según la literatura el valor de factor de seguridad mayor a 1.5 corresponde a un talud estable, mientras que valores de factor de seguridad menores a 1.5 representa un talud con deslizamiento. De los parámetros considerados para determinar el factor de seguridad usando elementos finitos (Tabla 13), los parámetros más influyentes son la cohesión y el ángulo de fricción interna. La influencia de dichos parámetros se puede observar en la Tabla 15, donde se aprecia los resultados de un análisis exhaustivo evaluando el comportamiento del factor de seguridad y la cohesión de la composición suelo-roca del talud. En la Figura N° 56. Los métodos tradicionales muestran una relación lineal entre el factor de seguridad y la variación de la cohesión. Esta relación se puede escribir como como una relación $FS \sim aC_{ef} + b$, donde los parámetros pueden ser determinados a través de una regresión lineal. Mientras que para el MEF, los resultados de los valores de la relación entre el factor de seguridad y la cohesión tienden a tener un comportamiento logaritmica esto se puede expresar como, $FS \sim \alpha e^{\beta C_{ef}}$, cuyos parámetros α y β , por determinar. La determinación de los parámetros α y β se consigue a través de una regresión no lineal.

5.3. Evaluación de la precisión de los métodos.

Según los resultados mostrados en la tabla 13 y la tabla 14, los métodos tradicionales a menudo tienden a sobre estimar el valor del factor de seguridad en comparación al MEF, este hecho puede generar un falso pronóstico indicando una falsa estabilidad del talud. Justamente estos falsos pronósticos se pueden observar en la matriz de confusión que se muestran en la Figura N° 53 y la Figura N° 54, donde se observa que el método de elementos finitos se equivoca una vez en una de sus predicciones de estabilidad de talud indicando que un talud es estable cuando en realidad ocurrió un deslizamiento. Respecto a las equivocaciones de los métodos tradicionales, estos se

equivocaron 4 veces, en cuatro de ellos indican que los taludes son estables cuando en realidad ocurre un deslizamiento.

5.4. Evaluación de la eficiencia de los métodos

A parte de la matriz de confusión, el cual cuantifica el número de errores que ocurre al aplicar los métodos, es necesario cuantificar la eficiencia del método, esto se consigue a través de la curva ROC y determinando al área bajo la curva (AUC, del inglés Área Under the Curve). Así los cálculos muestran que el método Bishop que representa a los métodos tradicionales tiene un ROC-AUC de 0.500, mientras el MEF muestra $\text{ROC-AUC} = 0.875$. esto indica que el MEF es más eficiente que los métodos tradicionales.

5.5. Influencia del triángulo finito

A parte de la cohesión otro parámetro que influye de forma considerable en la estabilidad de los taludes es el lado del triángulo finito considerado en el análisis de elementos finitos. Esto se probó cuando se realizó las simulaciones en el perfil de un talud como se muestra en la Figura N° 57. El incremento del lado del triángulo produce un resultado del factor de seguridad incrementado. Esto quiere decir que la variación creciente del lado del triángulo finito genera la variación también creciente del factor de seguridad del talud.

5.6. Influencia del ángulo de fricción interna

Otro factor muy importante e influyente en el factor de seguridad es el ángulo de fricción interna, como se puede corroborar con los resultados graficados en la Figura N° 58, el análisis se realizó en el perfil de un talud manteniendo todos los parámetros constantes excepto el ángulo de fricción interna, el cual se hizo variar de 15 a 80 grados obteniendo factores de seguridad que varían de 1.3 hasta 5.4, estos resultados sugieren que la variación del factor de seguridad es directamente proporcional a la variación del ángulo de fricción interna.

CONCLUSIONES

1. En respuesta al primer problema específico y al primer objetivo específico el cual consiste en determinar los parámetros geotécnicos que influyen en la determinación de la estabilidad de taludes. En conclusión, los parámetros geotécnicos más influyentes son: el ángulo de fricción interna, el peso unitario y la cohesión, con grados de correlación de 0.67, 0.73 y 0.46 (ver Figura N° 50), respectivamente.
2. Respecto al segundo problema específico y segundo objetivo específico el cual es el de determinar la precisión del método de elementos finitos. Esto se consiguió con la cuantificación de la precisión a través de la matriz de confusión (ver Figura N° 53 y la Figura N° 54). De este análisis se obtuvo que el método de elementos finitos acierta en 15 predicciones y solo se equivoca en 1 predicción de un total de 16 taludes analizados. De esto se concluye que el método de elementos finitos es altamente preciso respecto a los métodos tradicionales, los cuales se equivocan en 4 predicciones de los 16 taludes analizados.
3. En respuesta al tercer problema específico y tercer objetivo específico, el cual fue el de aplicar el método de elementos finitos para determinar la estabilidad de taludes. La aplicabilidad del método de elementos finitos depende de la eficiencia del método para predecir la estabilidad de taludes. Esta eficiencia alcanzó un valor de 0.875 (ver Figura N° 52). El método de elementos finitos es aplicable para la determinación de la estabilidad de taludes.
4. En respuesta al problema general y al objetivo general el cual es el de determinar la estabilidad de taludes utilizando el método de elementos finitos. Se puede concluir respondiendo al problema general planteado al inicio de la investigación, afirmando que el método de elementos finitos influye con una eficiencia de 0.875 y una precisión del 93.75%. Con esto se puede afirmar que el objetivo general fue alcanzado satisfactoriamente. Los resultados cuantitativos verificables en el anexo 8.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda al analista geotécnico, que para la estimación precisa del factor de seguridad es necesario tener los valores precisos del peso unitario, ratio de Poisson, módulo de elasticidad, módulo de carga y descarga, ángulo de fricción interna, la cohesión del suelo, ángulo de dilatación y el peso unitario saturado.
2. Se recomienda al analista geotécnico, utilizar el área bajo la curva de la curva ROC para determinar la precisión en la predicción de la estabilidad de taludes utilizando el método de elementos finitos.
3. Se recomienda al analista geotécnico, usar la matriz de confusión para determinar la eficiencia del método de elementos finitos.
4. Se recomienda al analista geotécnico, que para el cálculo preciso del factor de seguridad es necesario considerar los parámetros utilizados en la presente investigación y el uso del software Geo5 Versión 2022.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, A., Lyamin, A. V., Huang, J., Li, J. H., Cassidy, M. J., & Sloan, S. W. (2017). Probabilistic stability assessment using adaptive limit analysis and random fields. *Acta Geotechnica*, *12*(4), 937-948. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11440-016-0505-1>
- Arshad, I., Babar, M. M., & Javed, N. (2017). Numerical Analysis of Seepage and Slope Stability in an Earthen Dam by Using Geo-Slope Software. *PSM Biological Research*, *2*(1), 13-20.
- Basahel, H., & Mitri, H. (2017). Application of rock mass classification systems to rock slope stability assessment: A case study. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *9*(6), 993-1009.
- Bieniawski, Z. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications*. A Wiley Interscience Publication.
- Bui, X.-N., Nguyen, H., Choi, Y., Thoi, T., Zhou, J., & Dou, J. (18 de junio de 2020). Prediction of slope failure in open-pit mines using a novel hybrid artificial intelligence model based on decision tree and evolution algorithm. *Scientific Reports*, *10*, 1-17.
- Call, R. D., & Savely, J. P. (1990). Open Pit Rock Mechanics. *Society for Mining, Metallurgy and Exploration*, 860-882.
- Callot, P., Sempère, T., Odonne, F., & Robert, E. (2008). Giant submarine collapse of a carbonate platform at the Turonian-Coniacian transition : the Ayabacas Formation, southern Peru. *Basin Research*, *20*(3), 333-357.
- Calsina Otoronco, X. (2022). *Implementación de dashboards para el monitoreo y control en tiempo real de las operaciones de carguio y acarreo en Antapaccay*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cardenas Castro, M., & Huaman Condori, E. (2022). *Optimizar la Recuperación de Cobre por la Influencia de P80, el pH y la Dosificación de Reactivos de Flotación en la CIA. Minera Antapaccay S.A.* Cusco: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

- Carlotto, V. (1992,1998,2004). Evolution andine et raccourcissement au niveau de Cusco (13°-16°S) , Pérou : Enregistrement sédimentaire, chronologie, contrôles paléogéographiques, évolution cinématique. *Thèse Doct. Univ. Grenoble I*, 159.
- Ccapa Cuti, D. (2019). *Procesos de Operación Ore Control en el Yacimiento Porfido-Skarn de la Mina Antapaccay Compañía Glencore-Cusco-Perú*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cerpa Cornejo, L. M., & Meza Mendez, P. M. (2001). *Las Cuencas Neogenas del Sur del Perú. La cuenca Descanso-Yauri (Mioceno)*. Cusco: Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Chakraborty, A., & Goswami , D. (2017). Prediction of slope stability using multiple linear regression (MLR) and artificial neural network (ANN). *Arabian Journal of Geosciences*, 10(17), 1-11.
- Chen, R., & Chameau, J.-L. (1983). Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes. *Géotechnique*, 33, 31-40.
- Cheng, Y. M., Lansivaara, T., & Wei, W. B. (2007). Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods. *Computers and Geotechnics*, 34(3), 137-150.
- Duncan, M. J., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- Dyson , A. P., & Tolooiyan, A. (2019). Prediction and classification for finite element slope stability analysis by random field comparison. *Computers and Geotechnics*, 109, 117-129.
- Eberhardt, E. (2008). Twenty-ninth Canadian Geotechnical Colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep-seated rock slope failure mechanisms. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4), 484-510.
- Escobar Chanalata , S. H., & Flores Carvajal , M. D. (2017). *Estudio de estabilidad de taludes del paso lateral de la ciudad de Macas*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/7671>

- Essa, K. S., & Elhoussein, M. (2020). Interpretation of Magnetic Data Through Particle Swarm Optimization: Mineral Exploration Cases Studies. *Natural Resources Research*, 29(1), 521-537.
- Fredlund, D. G., & Scoular, R. E. (1999). Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis. *Proceedings of the International Symposium on Slope stability Engineering*, 31-47.
- Gao, W., Raftari, M., Rashid, A., Mu'azu, M., & Jusoh, W. (2020). A predictive model based on an optimized ANN combined with ICA for predicting the stability of slopes. *Engineering with Computers*, 36(1), 325-344.
- Gomez Tique, E. (2019). *Aplicación de modelo predictivo de daño (CROSS HOLE) para determinar la vibración pico partícula máxima (VPPc) producida por voladura y controlar la estabilidad de talud, mina Constancia - 2019*. Moquegua: Universidad Nacional de Moquegua. Obtenido de <https://repositorio.unam.edu.pe/handle/UNAM/97>
- Hazari, S., Sharma, R. P., & Ghosh, S. (2020). Swedish Circle Method for Pseudo-dynamic Analysis of Slope Considering Circular Failure Mechanism. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 2573-2589. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10706-019-01170-y>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2019). *Metodología de la investigación*. México: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Huamani , O., & Newton , J. (2018). *Estandarización de la distancia de descarga de camiones mineros en botaderos de desmonte mina, mediante análisis de estabilidad de Taludes Unidad Minera Constancia*.
- Jellali , B., & Frikha, W. (2017). Constrained Particle Swarm Optimization Algorithm Applied to Slope Stability. *International Journal of Geomechanics*, 17(12).
- Jordán G, L., áñez V, E., cebedo Z , M., & Lázaro , M. (2014). Controles estructurales en el distrito minero de Tintaya. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 109, 67-72. Obtenido de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/BSGP-109-67.pdf>

- Krabbenhoft, K., & Lyamin, A. V. (2015). Strength reduction finite-element limit analysis. *Geotechnique Letters*, 5(4), 250-253. Obtenido de <https://doi.org/10.1680/jgele.15.00110>
- Li, A. J., Qian, Z., Jiang, J. C., & Lyamin, A. (2019). Seismic Slope Stability Evaluation Considering Rock Mass Disturbance Varying in the Slope. *Geotechnical Engineering*, 23, 1043-1054. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0963-8>
- Liu, S., Su, Z., Li, M., & Shao, L. (2020). Slope stability analysis using elastic finite element stress fields. *Engineering Geology*, 273.
- Luo, Z., Bui, X.-N., Nguyen, H., & Moayedi, H. (2021). A novel artificial intelligence technique for analyzing slope stability using PSO-CA model. *Engineering with Computers*, 37(1), 533-544. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s00366-019-00839-5>
- Matthews, C., Farook, Z., & Helm, P. (2014). Slope stability analysis-Limit equilibrium or the finite element method? *Ground Engineering*, 22-28. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/279176042_Slope_stability_analysis_-_limit_equilibrium_or_the_finite_element_method
- Mendoza Loayza, J. (2016). *Análisis de estabilidad de taludes de suelos de gran altura en la mina Antapaccay*. Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/7614>
- Naghadehi, M. Z., Jimenez, R., KhaloKakaie, R., & Jalali, S. M. (2013). A new open-pit mine slope instability index defined using the improved rock engineering systems approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 1-14. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1365160913000282?via%3Dihub>
- Ng, C., Qu, C., Cheung, R., Guo, H., Ni, J., Chen, Y., & Zhang, S. (2021). Risk assessment of soil slope failure considering copula-based rotated anisotropy random fields. *Computers and Geotechnics*, 136.
- Orihuela Roman, J. C. (2006). *Teoría de Mohr-Coulomb Version Final*.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., . . . Muhr, R. (2003). Porphyry-style Alteration and mineralization of the Middle Eocene-Early Oligocene Andahuaylas-Yauri Belt, Cuzco Region, Peru. *Economic Geology*, 98(8), 1575-1605.

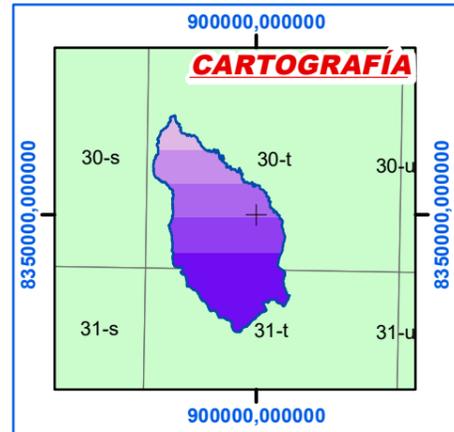
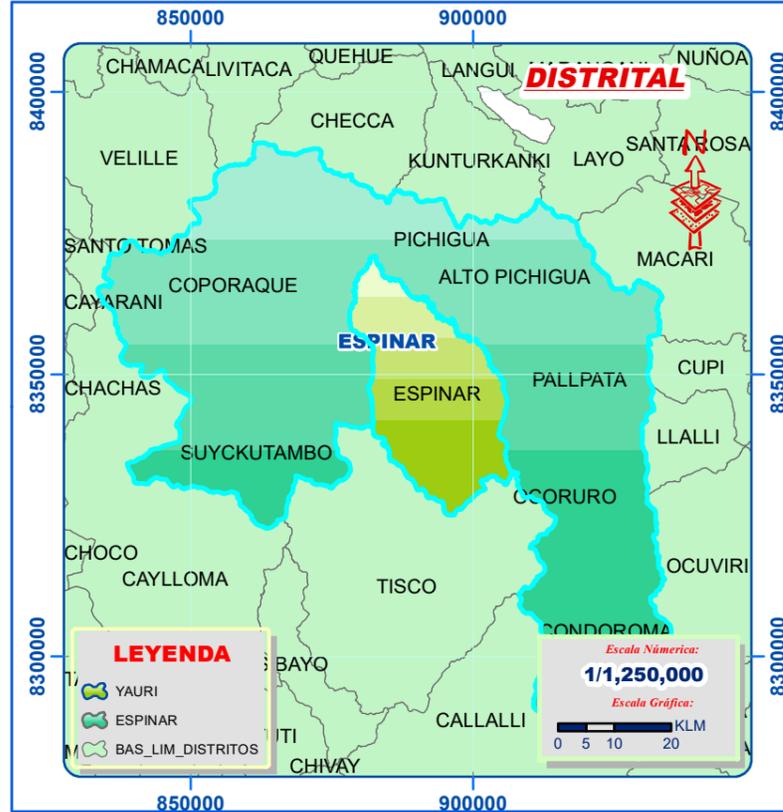
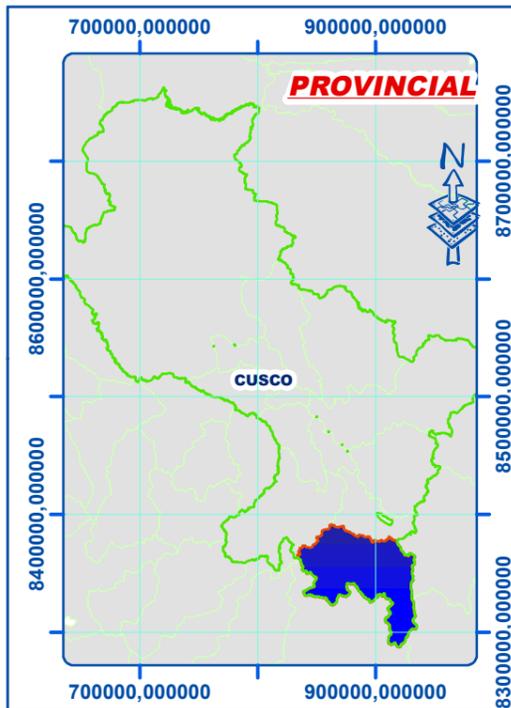
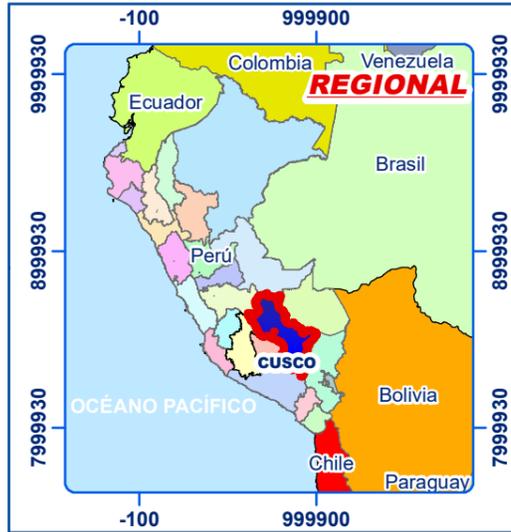
- Qi , C., & Tang, X. (2018). Slope stability prediction using integrated metaheuristic and machine learning approaches: A comparative study. *Computers & Industrial Engineering*, 118, 112-122.
- Santivañez Yauri, M. J. (2019). *Caracterización geomecánica del macizo rocoso para la aplicación de SLC en el cuerpo Coroccohuayco de Compañía Minera AntapaccayS.A.* Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Sengupta, A., & Giri, D. (2011). Dynamic analysis of soil-nailed slope. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 164(4), 225-234.
- Serna, R. R. (2009). *Petrología y Geoquímica en el Skarn de CU-AU de la Mina Tintaya, Cusco.* Universidad Nacional de Ingeniería.
- Sloan, S. W. (2013). Geotechnical stability analysis. *Géotechnique*, 63(7), 531-571. Obtenido de <https://doi.org/10.1680/geot.12.RL.001>
- Suárez Díaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales.* Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.
- Turpo Phuño, J. I. (2018). *Determinación de los parámetros geométricos del talud, para garantizar la estabilidad del tajo superficial del área de explotación en la unidad minera Moises Randy 2010.* Moquegua: Universidad Nacional de Moquegua.
- Ukritchon, B., & Keawsawasvong, S. (2019). Three-dimensional lower bound finite element limit analysis of an anisotropic undrained strength criterion using second-order cone programming. *Computers and Geotechnics*, 106, 327-344.
- Vick, L., Böhme, M., Rouyet, L., Bergh, S., Corner, G., & Lauknes , T. (2020). Structurally controlled rock slope deformation in northern Norway. *Landslides*, 17, 1745-1776. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-020-01421-7>
- Xstrata Tintaya S.A. (2011). Publicación de Xstrata Tintaya S.A Año 3 N° 12 Agosto 2011. 12.
- Zain, M. F., & Abd, S. M. (2009). Multiple regression model for compressive strength prediction of high performance concrete. *Journal of Applied Sciences*, 9(1), 155-160. Obtenido de <https://doi.org/10.3923/jas.2009.155.160>

ANEXOS

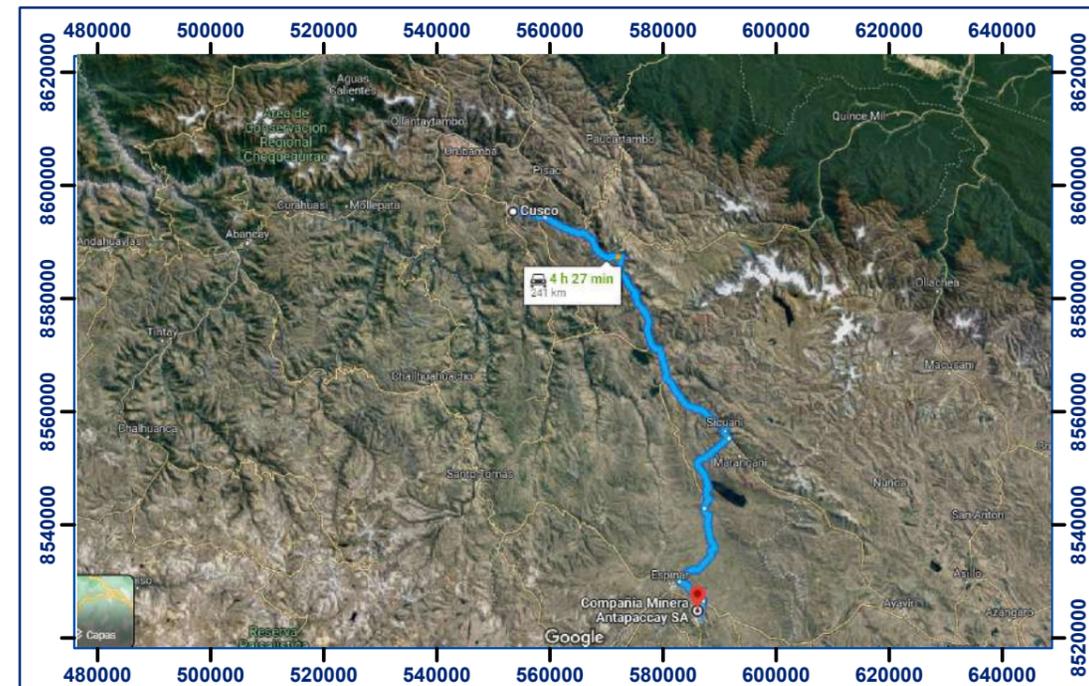
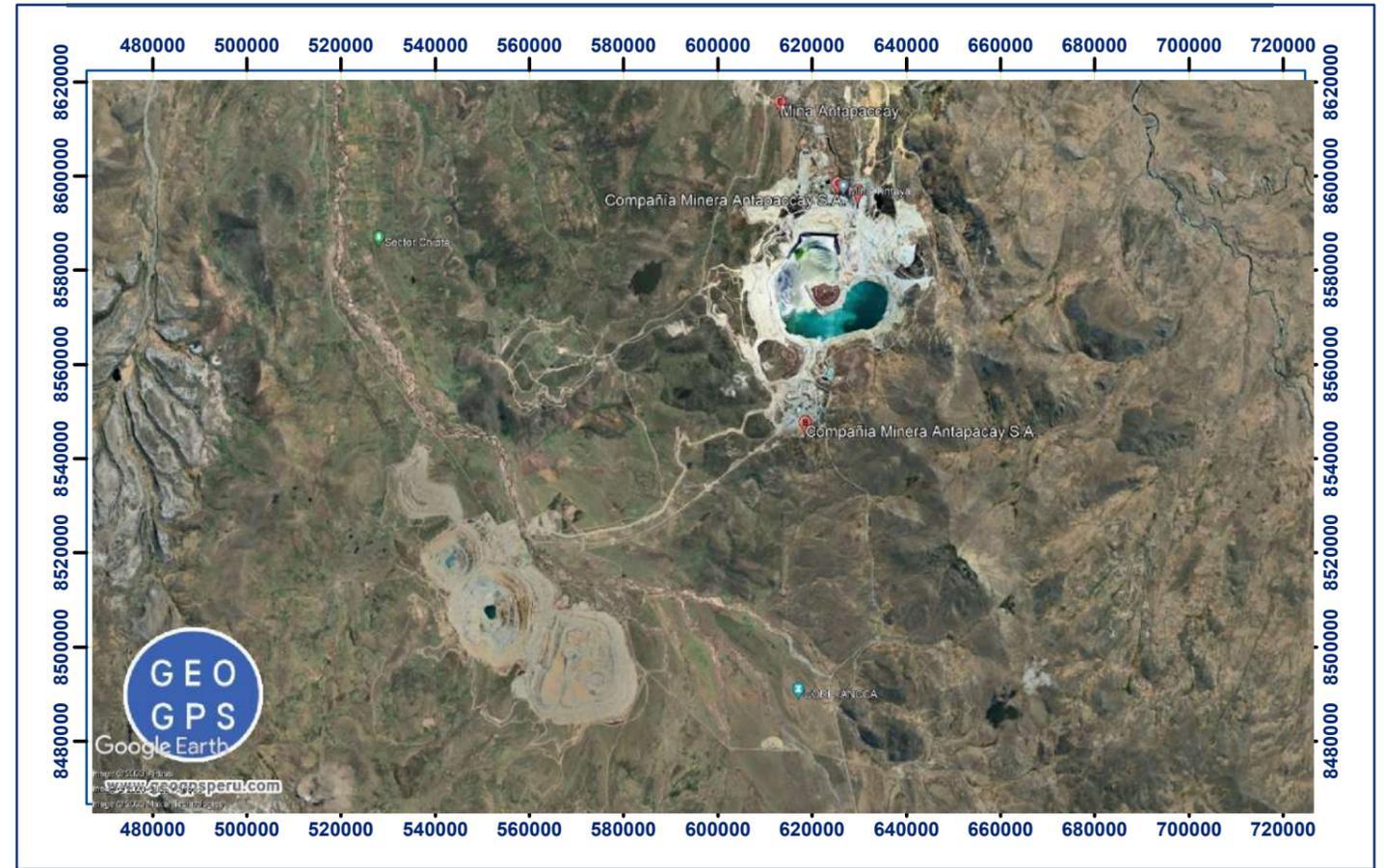
Anexo 1: Matriz De Consistencia

APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY- CUSCO					
Problema de Investigación	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología	Población y Muestra
<p>Problema General: ¿En qué medida influye la aplicación del método de elementos finitos en la determinación de la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay?</p>	<p>Objetivo General: Determinar la estabilidad de taludes utilizando el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.</p>	<p>Hipótesis General: La aplicación directa del método de elementos finitos es determinar la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.</p>	<p>Variable Independiente: Aplicación del método de elementos finitos.</p>	<p>Enfoque de Investigación Cuantitativa.</p> <p>Nivel de Investigación Explicativo.</p> <p>Diseño de Investigación Experimental.</p>	<p>Población: Registro de los valores de las mediciones de los parámetros de taludes que presentaron fallas (o desplomes) y de taludes estables.</p> <p>Muestra: muestreo por conveniencia.</p> <p>Técnicas: Análisis documental.</p>
<p>Problemas Específicos: ¿Cuáles son los parámetros geotécnicos que influyen en la aplicación del método de elementos finitos al determinar la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?</p>	<p>Objetivos Específicos: Determinar los parámetros geotécnicos que influyen en la determinación de la estabilidad de taludes al aplicar el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.</p>	<p>Hipótesis Específicas: La determinación de los parámetros geotécnicos influyentes aplicando el método de elementos finitos permite determinar la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.</p>	<p>Indicadores: Curva ROC-AUC, Coeficiente de correlación y Resultados de matriz de consistencia.</p>		
<p>¿Cuál es la precisión del método de elementos finitos para determinar la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?</p>	<p>Determinar la precisión de las predicciones en la estabilidad de taludes al aplicar el método de elementos finitos en la mina Antapaccay.</p>	<p>La aplicación del método de elementos finitos permite determinar la estabilidad de taludes con precisión en la mina Antapaccay.</p>	<p>Variable dependiente: Determinación de la estabilidad de taludes.</p>		
<p>¿Cuál es la eficiencia del método de elementos finitos en la determinación de la estabilidad de los taludes en el tajo sur de la mina Antapaccay?</p>	<p>Determinar la eficiencia del método de elementos finitos para determinar la estabilidad de taludes en la Mina Antapaccay.</p>	<p>La aplicación del método de elementos finitos permite determinar con eficiencia la estabilidad de taludes en la mina Antapaccay.</p>	<p>Indicadores: Factor de seguridad.</p>		

Anexo2: Ubicación de la Mina Antapaccay

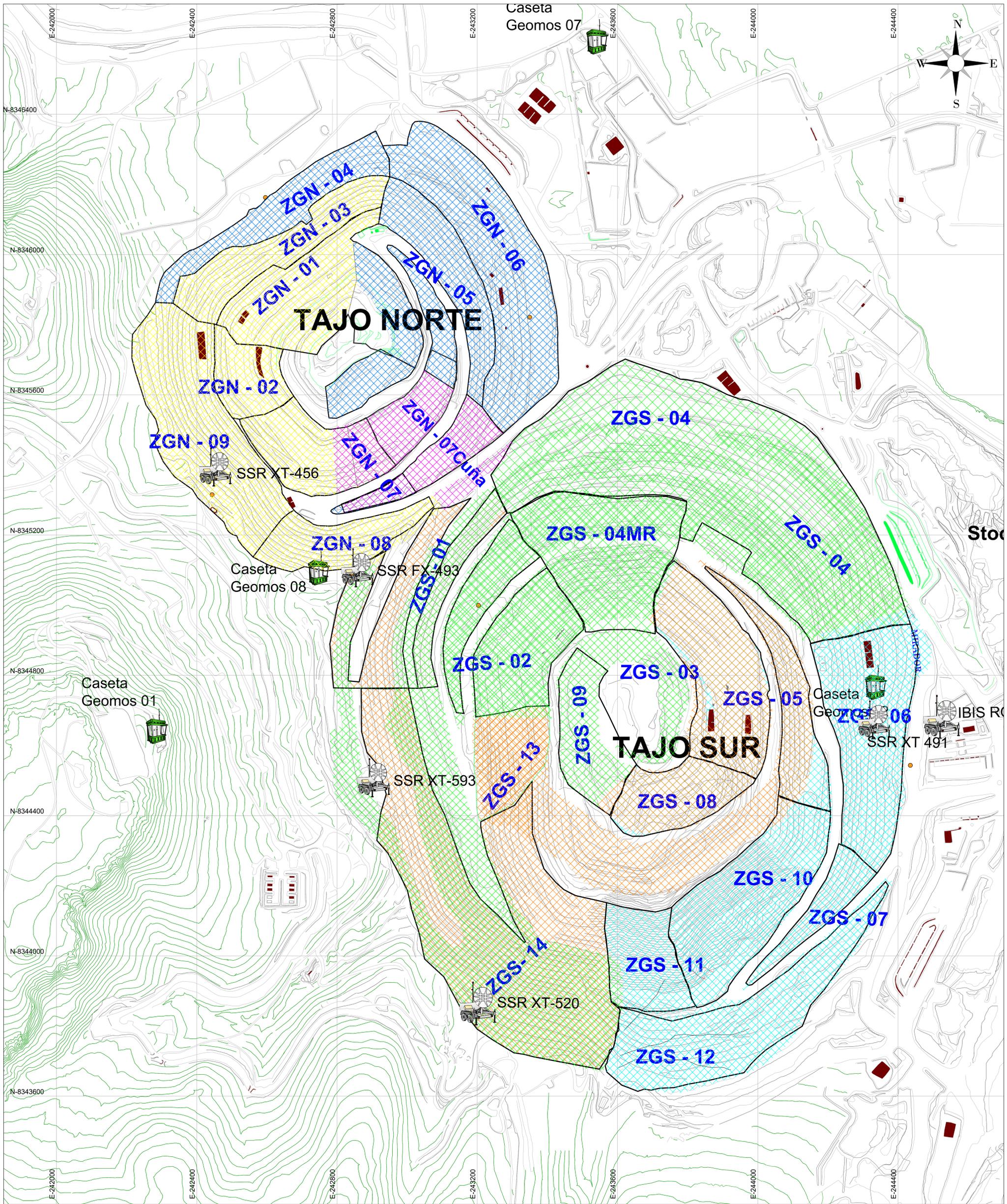


Projeted Coordinate System: WGS_1984_UTM_Zone_19s
 Geographic Coordinate System: GCS_WGS_1984
 Projection: Transverse Mercator
 False Easting: 500,000.0000
 False Northing: 10,000,000.0000
 Central Meridian: -75.0000
 Latitude Of Origin: 0.0000
 Scale Factor: 0.9996
 Datum: D_WGS_1984
 Units: Meter



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO			
PROYECTO: "APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN LA COMPAÑIA MINERA ANTAPACCAY- CUSCO"			
PLANO: PLANO DE UBICACIÓN			
PROYECTISTA: "BACH. GENRY Y CAYO CARDENAS MORALES"		COORDENADAS: UTM	LAMINA:
UBICACION: LOCALIDAD : MINA ANTAPACCAY DISTRITO : YAURI PROVINCIA : ESPINAR DEPARTAMENTO : CUSCO		ESCALA: INDICADA	FECHA: OCTUBRE - 2023
			PU-01

Anexo 3: Plano de Zonas Geotécnicas de la Mina Antapaccay
PLANO DE ZONAS GEOTÉCNICAS MARZO 2023



LEYENDA

TAJO NORTE	
Radar SSR-XT 456	Sector de monitoreo
Radar SSR-XT 550	Sector de monitoreo crítico
Radar SSR-XT 520	Sector de monitoreo crítico
TAJO SUR	
Radar SSR-FX 493	Sector de monitoreo
Radar SSR-XT 520	Sector de monitoreo
Radar SSR-XT 491	Sector de monitoreo crítico

CASETA DE MONITOREO GEOTECNICO (GEOMOS)
 Sin cobertura de radar



GERENCIA DE GEOTECNIA
SUPERINTENDENCIA DE GEOTECNIA

ANTAPACCAY
 PLANO DE ZONAS GEOTÉCNICAS
 MINA ANTAPACCAY

PERIODO: MARZO
DISEÑO: GEOTECNIA
REVISADO: GEOTECNIA
APROBADO: GEOTECNIA
Nº DE PLANO: 35
ESCALA: 1/3500
DATUM: WGS84, ZONA 19S
FECHA: 27/03/2023

Anexo 4: Parámetros geotécnicos de taludes – tajo sur

Código: TAN-NOP-ING-001-REG-026 Versión: 026 Fecha de revisión: 27/03/2023	AREA GEOTECNIA – TAJO SUR	
---	----------------------------------	---

- Las coordenadas de los taludes del tajo sur.

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 1	0.00	0.00	Limo Graxoso
	28.90	19.36	
	76.30	40.00	
	98.00	50.00	
	19.00	15.00	
	43.00	30.00	
	80.50	40.00	
	99.00	50.00	
	23.10	15.00	
	63.00	30.00	
	93.80	50.00	
	28.90	19.36	
	99.00	31.23	
	51.41	20.43	
	77.35	25.47	
	0.00	0.00	
	84.37	21.51	
26.38	8.00		
99.00	23.13		
48.17	10.16		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 2	0.00	0.00	Caliza
	28.90	19.36	
	76.30	40.00	
	98.00	50.00	
	19.00	15.00	
	43.00	30.00	
	80.50	40.00	
	99.00	50.00	
	23.10	15.00	
	63.00	30.00	
	93.80	50.00	
	28.90	19.36	
	99.00	31.23	
	51.41	20.43	
	77.35	25.47	
	0.00	0.00	
	84.37	21.51	
26.38	8.00		
99.00	23.13		
48.17	10.16		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 3	51.41	20.43	Arenisca
	99.00	31.23	
	98.00	50.00	
	80.50	40.00	
	63.00	30.00	
	28.90	19.36	
	77.35	25.47	
	99.00	50.00	
	93.80	50.00	
	76.30	40.00	
	43.00	30.00	
	26.38	8.00	
	84.37	21.51	
	99.00	31.23	
	51.41	20.43	
	23.10	15.00	
	0.00	0.00	
	48.17	10.16	
	99.00	23.13	
	73.35	25.47	
	28.90	19.36	
	19.00	15.00	
	84.37	21.51	
26.38	8.00		
0.00	-50.00		
99.00	23.13		
48.17	10.16		
0.00	0.00		
99.00	-50.00		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 4	49.58	40.31	Arenisca
	111.54	118.30	
	100.28	99.30	
	90.95	88.30	
	78.05	73.00	
	39.95	62.00	
	0.00	8.86	
	111.54	46.20	
	103.30	99.30	
	95.14	88.30	
	83.15	73.00	
	71.90	62.00	
	0.00	13.65	
	49.58	40.31	
	0.00	-109.44	
	111.54	46.20	
	0.00	8.86	
111.54	-109.44		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 5	0.00	0.00	Grava, Caliza y Arenisca
	3.05	3.80	
	29.38	3.80	
	30.37	5.56	
	41.63	25.76	
	52.29	25.76	
	52.29	25.76	
	54.92	30.84	
	64.86	50.10	
	80.00	50.10	
	30.37	5.56	
	54.98	7.48	
	59.52	10.15	
	80.00	13.45	
	54.92	30.84	
	62.74	33.16	
	66.31	32.15	
71.60	34.56		
80.00	36.27		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 6	91.57	55.91	Arenisca
	73.11	46.52	
	46.37	25.95	
	14.18	21.28	
	6.36	11.83	
	0.00	-78.58	
	100.00	64.62	
	81.51	55.91	
	61.16	46.52	
	20.96	25.96	
	9.81	18.27	
0.00	0.00		
100.00	-78.58		


 JOSE ANTONIO SONCCO MARRON
 SUPERVISOR DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCA Y
 DNI: 29705345


 JHON MENDOZA PALOMINO
 GERENTE DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCA Y
 DNI: 41411560

Código: TAN-NOP-ING-001-REG-026
 Versión: 026
 Fecha de revisión:
 27/03/2023

AREA GEOTECNIA - TAJO SUR



N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 7	138.44	97.31	Arenisca y Caliza
	116.50	81.79	
	90.29	48.16	
	69.42	31.86	
	50.14	17.94	
	33.74	3.92	
	0.00	0.00	
	150.00	-97.31	
	128.48	90.71	
	105.64	71.11	
	78.24	48.16	
	59.63	31.86	
	40.40	17.94	
	3.75	3.98	
	0.00	-97.31	
150.00	97.31		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 8	94.36	71.89	Arenisca
	83.26	62.39	
	67.68	51.35	
	50.60	32.31	
	0.00	0.00	
	100.00	-78.58	
	86.80	71.88	
	75.56	62.41	
	60.01	51.34	
	25.57	32.31	
	0.00	-78.58	
100.00	80.50		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 9	120.05	80.01	Arenisca
	99.28	72.50	
	74.76	63.21	
	61.64	45.48	
	44.05	29.76	
	31.09	15.24	
	0.00	0.00	
	130.00	-80.20	
	111.18	72.50	
	89.28	63.21	
	70.19	60.72	
	52.14	45.48	
	37.61	29.76	
	10.13	15.24	
0.00	-80.20		
130.00	80.01		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 10	117.18	78.13	Arenisca y Caliza
	104.55	68.36	
	90.58	57.85	
	75.11	49.76	
	60.58	37.70	
	13.98	19.10	
	0.00	-84.52	
	130.00	84.51	
	107.11	74.54	
	93.95	63.93	
	80.62	53.82	
	68.75	37.70	
	51.37	19.10	
	0.00	0.00	
	130.00	-84.52	

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 13	146.60	104.51	Arenisca y Caliza
	144.43	103.30	
	142.04	100.63	
	129.62	90.49	
	121.06	79.12	
	107.39	70.98	
	103.34	68.11	
	90.29	48.16	
	84.46	47.88	
	81.00	42.55	
	78.93	38.75	
	68.09	32.17	
	53.21	17.69	
	3.75	4.21	
	0.00	-104.51	
	150.00	104.51	
	145.30	104.23	
	142.81	100.63	
	133.39	90.49	
	122.39	79.12	
	117.97	70.98	
	105.73	70.35	
	100.81	63.88	
	87.04	48.16	
	81.60	42.49	
	79.11	38.73	
	75.94	32.17	
	62.21	17.69	
	47.42	4.21	
	0.00	0.00	
150.00	-104.51		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 12	138.44	97.31	Arenisca
	116.50	81.79	
	90.23	48.16	
	69.42	31.86	
	50.14	17.94	
	33.74	3.92	
	0.00	0.00	
	150.00	-97.31	
	128.48	90.71	
	105.64	71.11	
	78.24	48.16	
	59.63	31.86	
	40.40	17.94	
	3.75	3.92	
0.00	-97.31		
150.00	97.31		

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
Talud 11	8.00	7.50	Limo Gravelo y Arenisca
	16.00	15.00	
	46.00	15.00	
	67.20	32.50	
	72.30	32.50	
	93.60	48.30	
	46.00	15.00	
	54.00	16.40	
	74.60	17.60	
	93.60	23.50	

JOSE ANTONIO SANCHEZ
 SUPERVISOR DE GEOTECNIA
 C.A. ANTAPACCAY
 DNI: 23715348

JHON MENDOZA PALOMINO
 GEOTECNICO

Código: TAN-NOP-ING-001-REG-026
 Versión: 026
 Fecha de revisión:
 27/03/2023

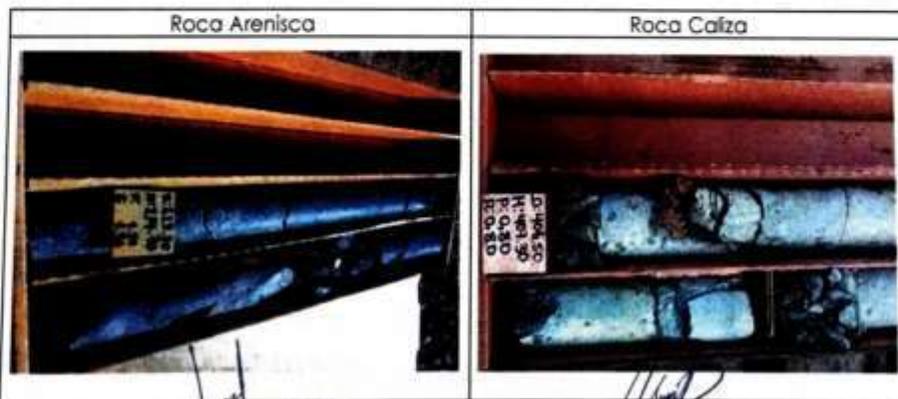
AREA GEOTECNIA - TAJO SUR



N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
	133.39	90.49	Arenisca
	129.57	86.76	
	125.78	83.97	
	121.06	79.12	
	107.39	70.98	
	102.87	63.88	
	96.31	54.74	
	90.29	48.16	
	81.60	42.49	
	79.11	38.73	
	75.94	32.17	
	65.87	28.07	
	60.98	23.70	
	57.09	18.30	
	51.64	12.41	
	47.42	4.21	
	0.00	0.00	
	150.00	-90.49	
	131.05	86.76	
	128.16	83.97	
	122.93	79.12	
	117.97	70.98	
	105.73	70.35	
	100.81	63.88	
	94.70	54.74	
	84.46	48.16	
	81.00	42.55	
	78.93	38.75	
	68.09	32.17	
	0.00	-90.49	
	150.00	90.49	

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
	140.45	107.55	Arenisca
	135.73	100.85	
	131.08	95.15	
	117.57	87.07	
	114.55	86.08	
	111.57	79.47	
	102.69	64.86	
	94.35	63.74	
	93.44	63.37	
	92.79	62.50	
	90.19	57.89	
	85.67	51.42	
	81.68	47.05	
	78.05	43.44	
	66.87	43.16	
	65.31	40.23	
	63.29	38.08	
	61.47	36.17	
	57.63	30.83	
	51.13	22.41	
	0.00	0.18	
	150.00	-107.82	

N°	Coordenadas de los taludes [m]		tipo de Suelo/Roca
	X	Z	
	139.76	102.55	Arenisca
	136.94	98.67	
	136.24	98.25	
	135.31	97.23	
	132.02	92.83	
	126.25	87.07	
	115.51	86.07	
	113.41	85.12	
	110.35	79.62	
	95.78	64.86	
	93.84	63.72	
	93.09	63.17	
	92.54	62.40	
	89.53	57.63	
	84.79	51.51	
	80.81	47.07	
	70.89	43.44	
	69.17	42.11	
	67.29	47.03	
	65.08	38.08	
	64.01	36.67	
	62.40	33.53	
	54.92	26.92	
	53.11	25.28	
	51.43	23.11	
	51.32	22.99	
	51.12	22.72	
	50.35	22.72	
	16.88	22.41	
	0.00	-107.82	



JOSE ANTONIO SANCHEZ MARRON
 SUPERVISOR DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCAY
 DNI: 29705345

JHON MENDOZA PALOMINO
 GERENTE DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCAY
 DNI: 41411589

Código: TAN-NOP-ING-001-REG-026
 Versión: 026
 Fecha de revisión: 27/03/2023

AREA GEOTECNIA - TAJO SUR



- Parámetros geotécnicos de taludes de excavación del tajo sur.

Talud	Ubicación	H	Beta	γ	cef	ϕ_{ef}	Ru	E	v	γ_{sat}	Eur	ψ	Estabilidad
1	Tajo Sur	4	35	28.44	57.46	20	0	21	0.2	22	30	0.01	Estable
2		100	35	36	174	43	0	78	0.05	32	146	0.10	Estable
3		200	50	23	174	33	0	43	0.2	26	110	0.00	Falla
4		50	45	18.68	26.34	15	0	98	0.01	21	124	0.00	Falla
5		50	45	48	171	72	0	112	0.05	50	118	0.14	Estable
6		20	30	53	112	67	0	193	0.47	63	213	0.97	Estable
7		10	30	41	93	73	0	115	0.22	41	137	0.50	Estable
8		6	30	27	155	73	0	277	0.35	31	283	1.70	Estable
9		6	30	20	170	32	0	223	0.2	22	230	0.00	Estable
10		48	40,43	24.22	178,170	34.32	0	227	0.19	28	238	0.01	Falla
11		120	53	26	91	38	0	215	0.13	19	234	0.02	Estable
12		88	30	22	79	31	0	219	0.2	23	233	0.09	Falla
13		50	20	21	75	37	0	217	0.2	25	246	0.11	Falla
14		40	30	23	170	34	0	225	0.21	24	237	0.00	Estable
15		100	35	20	57	25	0	115	0.2	22	165	0.00	Falla
16		51	57,57,45	38,68,27,41,65	176,173,173	46,42,42	0	302	0.2	37	397	0.00	Estable
17		30.5	20	27	148	41	0	227	0.3	31	284	0.00	Estable
18		30.5	20	41	138	44	0	320	0.2	48	330	0.00	Estable
19		3.66	30	28	145	50	0	250	0.1	30	280	0.01	Estable
20		8.23	35	20	95	45	0	25	0.2	26	28	0.01	Estable

Donde:

- H: Altura de la pendiente.
- Beta: Angulo de inclinación de la pendiente.
- v: Coeficiente de poisson.
- γ_{sat} : Peso unitario saturado.
- cef: Cohesión del suelo.
- Eur: Módulos de descarga/recarga.
- ϕ_{ef} : Angulo de fricción interna.
- Ru: Coeficiente de presión de agua intersticial.

- ψ : Ángulo de dilatación.
- E: Módulo elástico.
- γ : Peso unitario.

JOSE ANTONIO SANCHEZ MARRON
 SUPERVISOR DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCAY
 DNI: 29705345

[Firma]
 JHON MENDOZA PALOMINO
 GERENTE DE GEOTECNIA
 C.M. ANTAPACCAY
 DNI: 41411680

Anexo 5: Imágenes del Tajo Sur - Zona de Estudio

En esta sección se muestran las imágenes de los taludes del tajo sur.

Fotografía 1: *Vista panorámica del tajo sur*



Fotografía 2: *Transporte y Acarreo del material fragmentado con camiones CAT 797F*



Fotografía 3: *Presencia de deslizamiento de taludes tajo sur*



Fotografía 4: *Deslizamiento de taludes en actividad minera tajo sur*



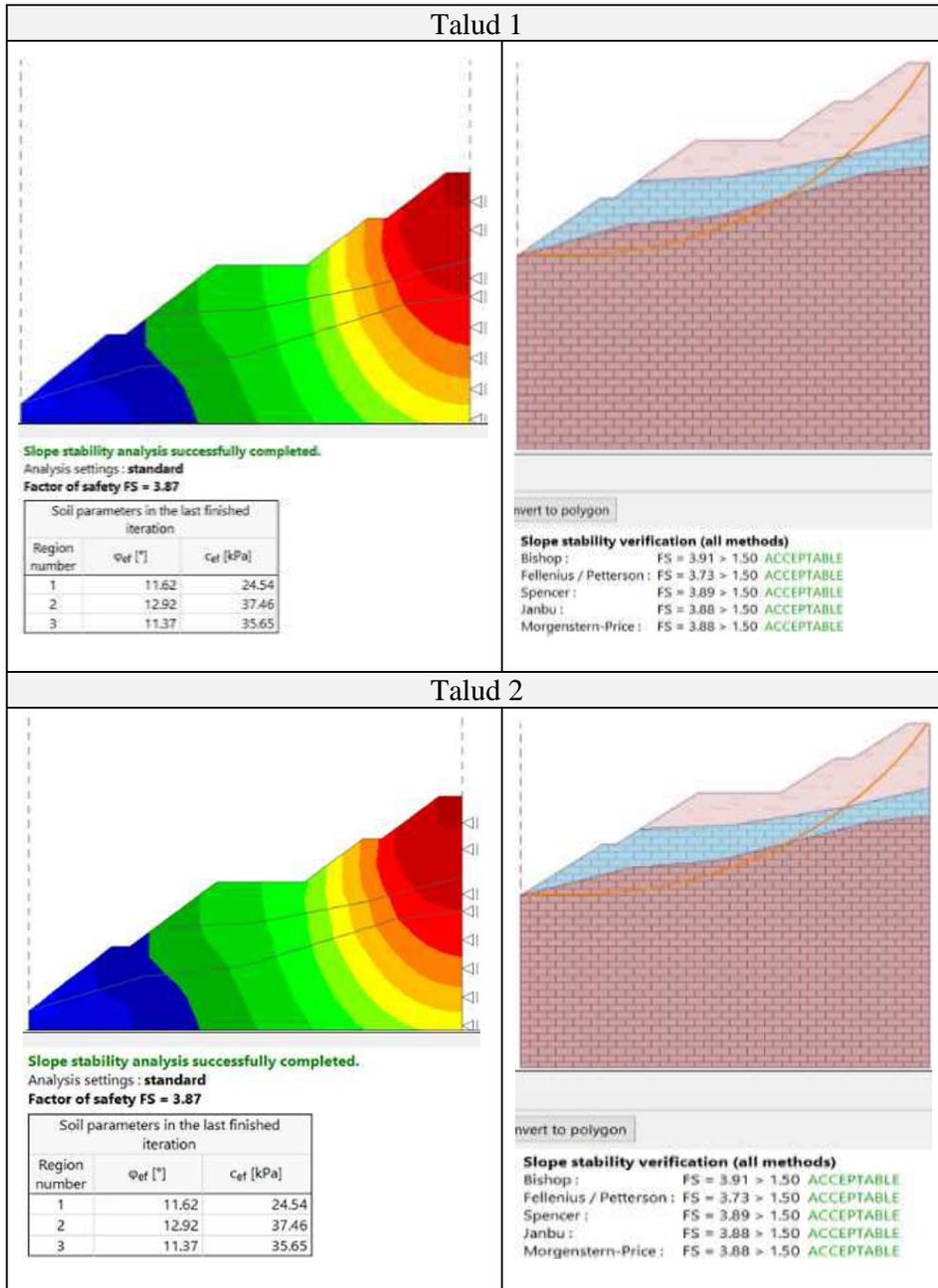
Fotografía 5: *Presencia de deslizamiento de taludes tajo sur*



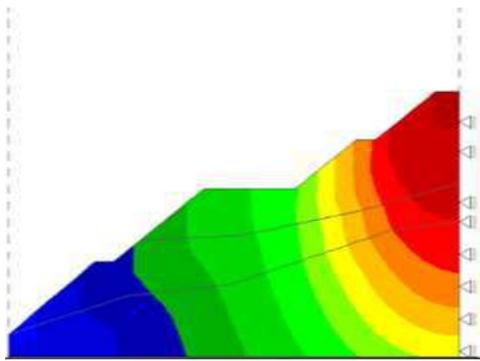
Fotografía 6: *Zonas de incidencia a deslizamiento en el tajo sur*



Anexo 6: Resultados del Análisis de taludes con el uso del software Geo5

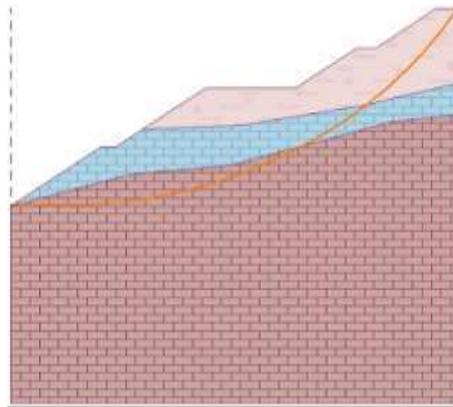


Talud 3



Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis Settings: **Standard**
Safety factor FS = 3.78

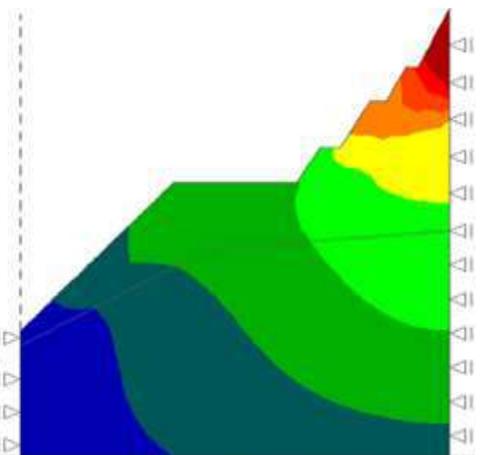
Soil parameters in the last finished iteration		
Zone number	Ψ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	10.35	23.64
2	11.65	36.22
3	10.26	34.28



invert to polygon

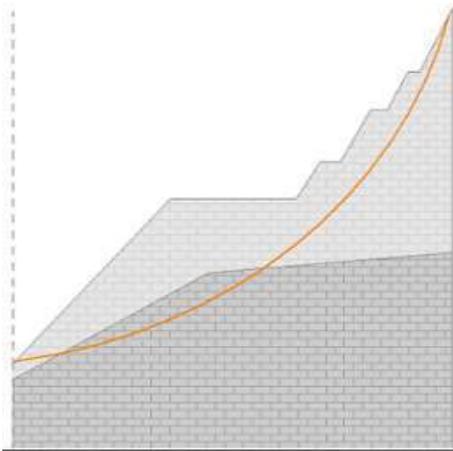
Slope stability verification (all methods)
 Bishop: FS = 3.91 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson: FS = 3.73 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer: FS = 3.89 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu: FS = 3.88 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price: FS = 3.88 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 4



Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis settings: **standard**
Factor of safety FS = 1.83

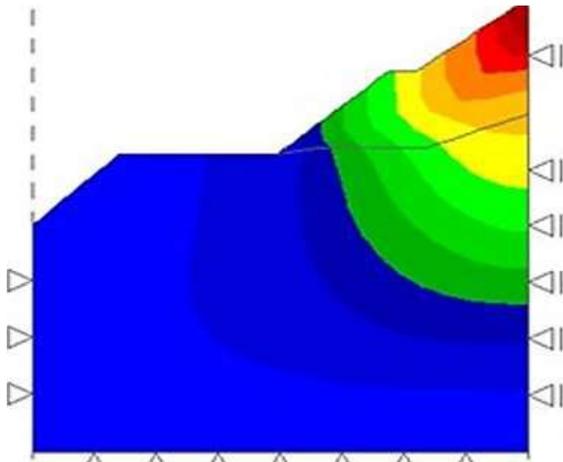
Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	Ψ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	23.52	95.17
2	23.52	95.17



invert to polygon

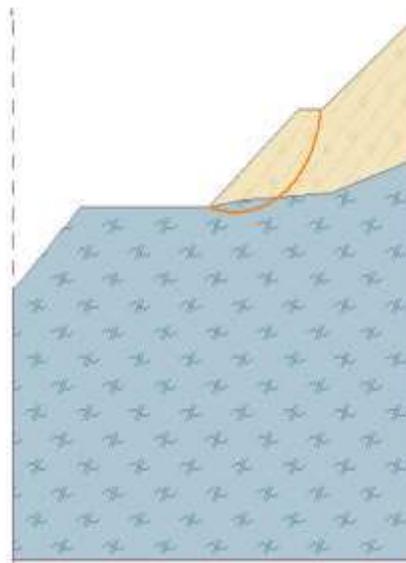
Slope stability verification (all methods)
 Bishop: FS = 2.32 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson: FS = 2.28 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer: FS = 2.35 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu: FS = 2.33 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price: FS = 2.42 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 5



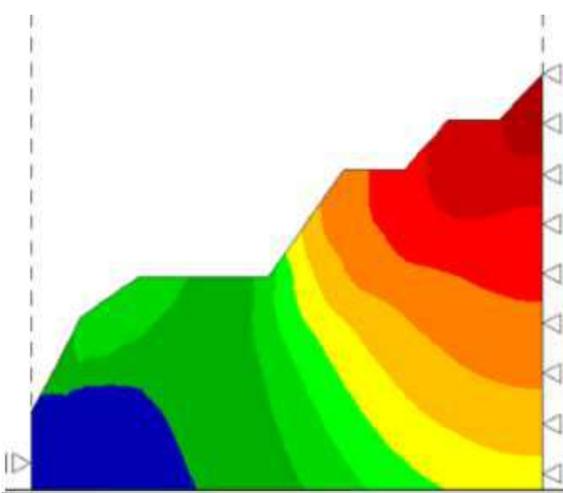
The slope stability analysis was completed satisfactorily
 Analysis Settings: **Standard**
Safety factor FS = 1.65

Soil parameters in the last finished iteration		
Zone number	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	13.94	30.99
2	11.78	37.19



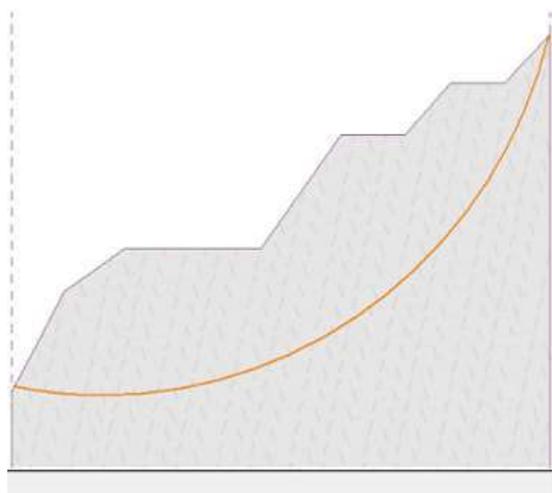
Circular slip surface		Slope stability verification (all methods)	
Center: x =	52.04 [m]	z =	34.35 [m]
Radius: R =	20.29 [m]	Bishop:	FS = 1.98 > 1.50 ACCEPTABLE
Angles: $\alpha_1 =$	-17.49 [°]	Fellenius / Petterson:	FS = 1.72 > 1.50 ACCEPTABLE
	$\alpha_2 =$	Spencer:	FS = 1.96 > 1.50 ACCEPTABLE
	84.76 [°]	Janbu:	FS = 1.96 > 1.50 ACCEPTABLE
		Morgenstern-Price:	FS = 1.96 > 1.50 ACCEPTABLE

Talud 6



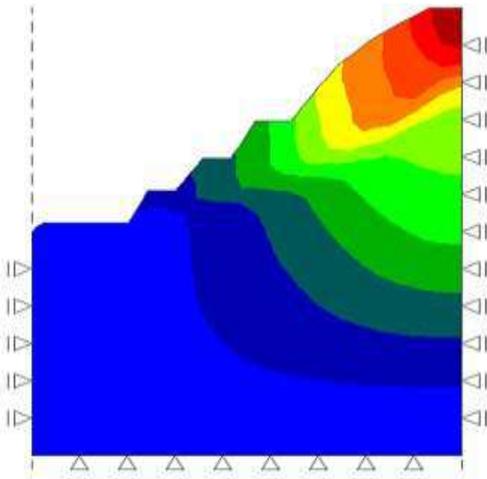
Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis settings: **standard**
Factor of safety FS = 1.41

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	φ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	17.77	40.51



Circular slip surface		Slope stability verification (all methods)	
Center: x =	52.04 [m]	z =	34.35 [m]
Radius: R =	20.29 [m]	Bishop:	FS = 1.57 > 1.50 ACCEPTABLE
Angles: $\alpha_1 =$	-17.49 [°]	Fellenius / Petterson:	FS = 1.44 < 1.50 NOT ACCEPTABLE
	$\alpha_2 =$	Spencer:	FS = 1.56 > 1.50 ACCEPTABLE
	84.76 [°]	Janbu:	FS = 1.57 > 1.50 ACCEPTABLE
		Morgenstern-Price:	FS = 1.57 > 1.50 ACCEPTABLE

Talud 7

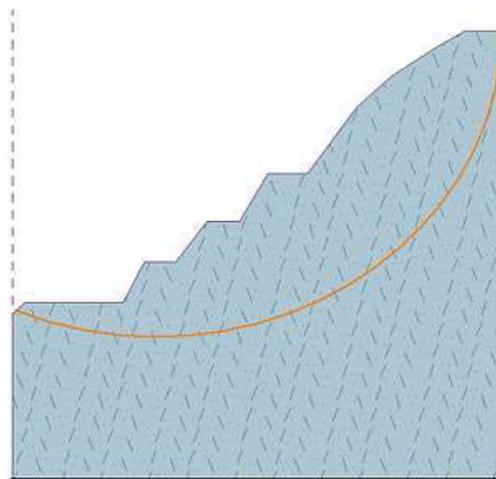


Slope stability analysis successfully completed.

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 1.71

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	18.66	99.13

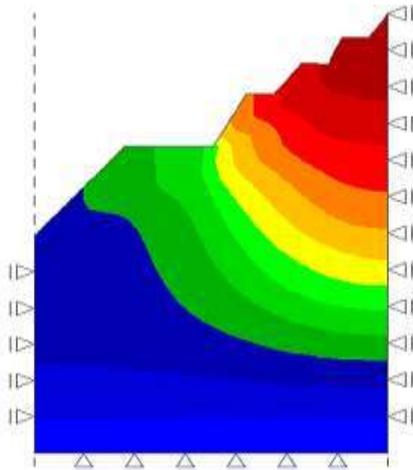


vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

Bishop : FS = 1.68 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 1.50 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 1.67 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 1.67 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 1.67 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 8

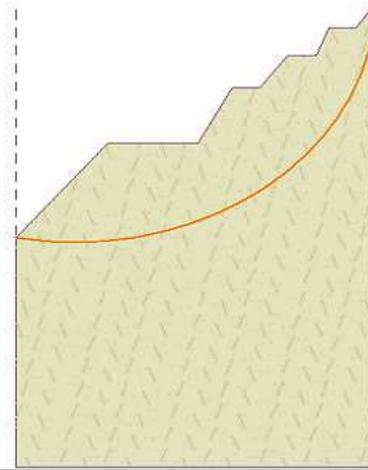


Slope stability analysis successfully completed

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 1.46

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	21.88	52.66

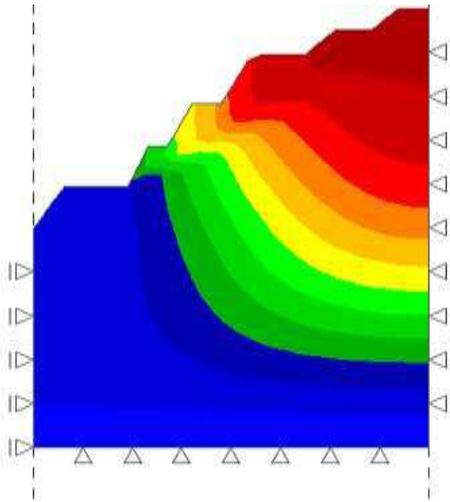


vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

Bishop : FS = 2.02 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 1.80 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 2.02 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 2.04 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 2.04 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 9

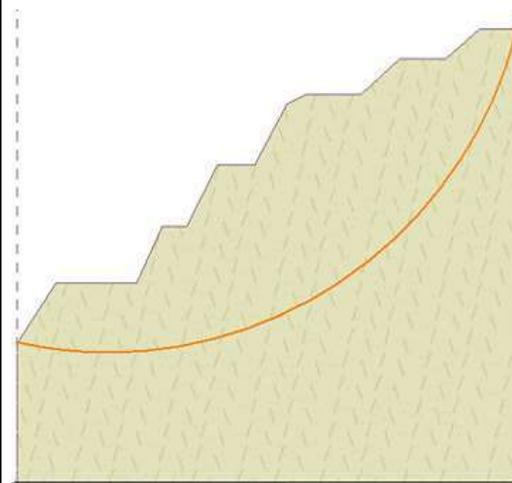


Slope stability analysis successfully completed.

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 1.44

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	22.16	53.33

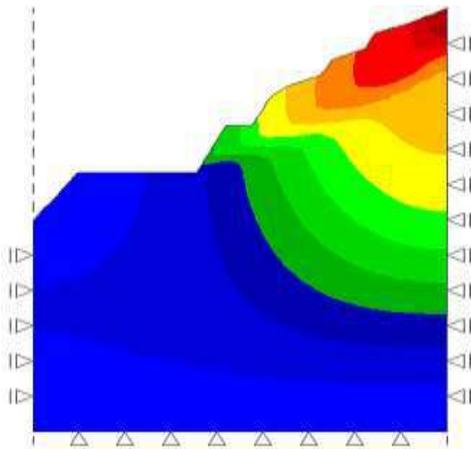


vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

Bishop : FS = 1.77 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 1.59 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 1.76 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 1.78 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 1.78 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 10

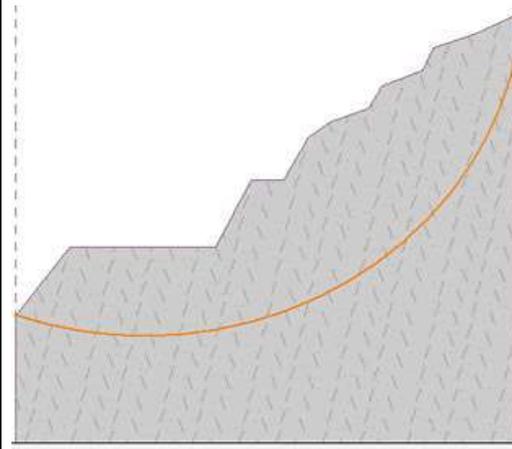


Slope stability analysis successfully completed.

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 1.50

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	21.34	60.01

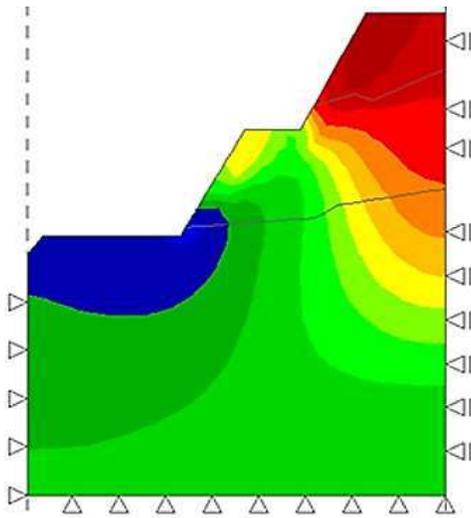


vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

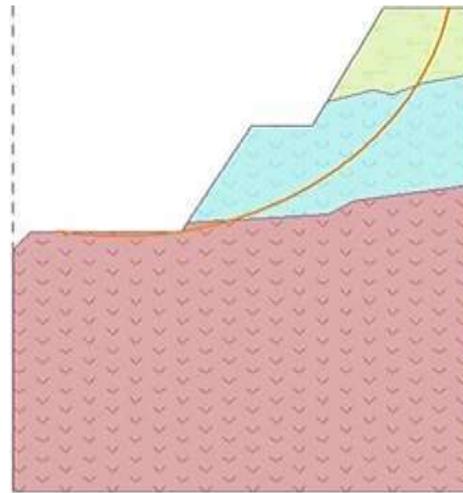
Bishop : FS = 1.73 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 1.57 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 1.73 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 1.73 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 1.73 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 11



The slope stability analysis was completed satisfactorily
 Analysis Settings: **Standard**
Safety factor FS = 1.83

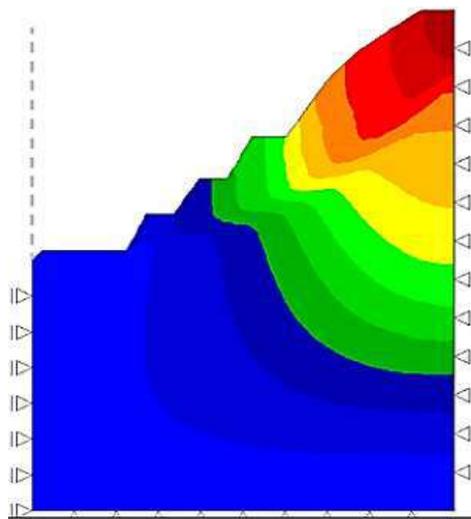
Soil parameters in the last finished iteration		
Zone number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	20.00	80.02
2	30.01	17.54
3	17.34	71.01



Center: x = 18.60 [m] z = 61.41 [m]
 Radius: R = 58.64 [m]
 Angles: $\alpha_1 = -10.75$ [°] $\alpha_2 = 78.87$ [°]

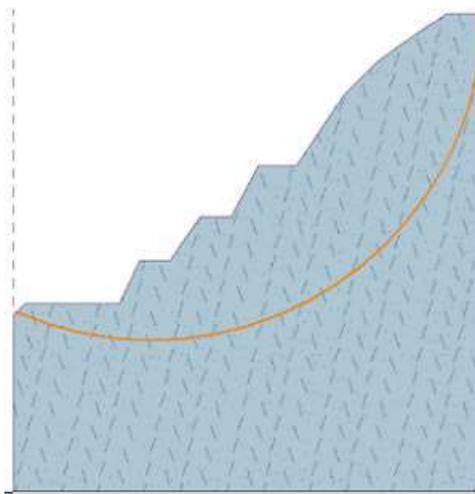
Slope stability verification (all methods)
 Bishop : FS = 2.32 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 2.28 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 2.35 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 2.33 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 2.42 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 12



Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis Settings: **Standard**
Safety factor FS = 1.63

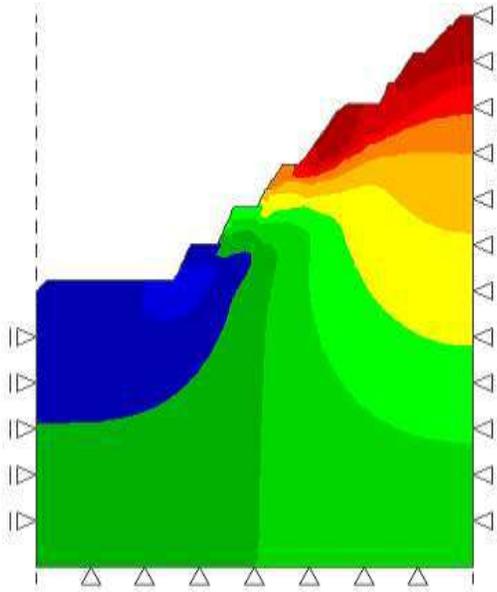
Soil parameters in the last finished iteration		
Zone number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	19.20	102.02



wert to polygon

Slope stability verification (all methods)
 Bishop : FS = 3.97 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Fellenius / Petterson : FS = 4.38 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Spencer : FS = 5.28 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Janbu : FS = 5.31 > 1.50 **ACCEPTABLE**
 Morgenstern-Price : FS = 5.31 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 13

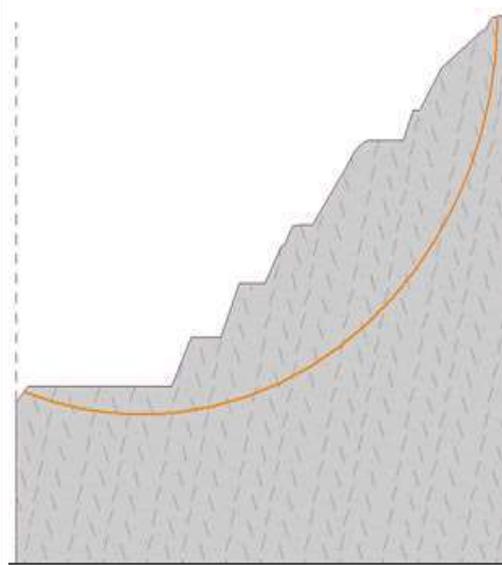


Slope stability analysis successfully completed.

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 3.73

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	19.59	41.59



vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

Bishop : FS = 3.66 > 1.50 **ACCEPTABLE**

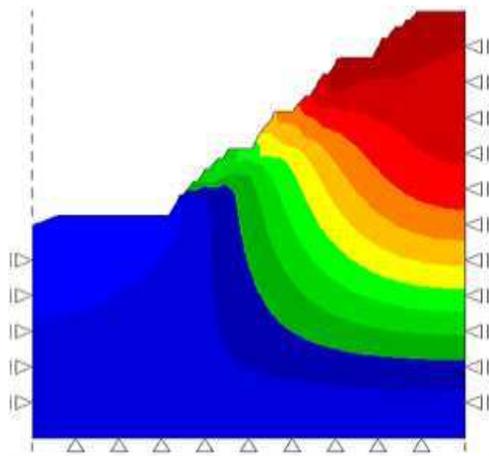
Fellenius / Petterson : FS = 5.37 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Spencer : FS = 6.35 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Janbu : FS = 6.40 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Morgenstern-Price : FS = 6.40 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 14

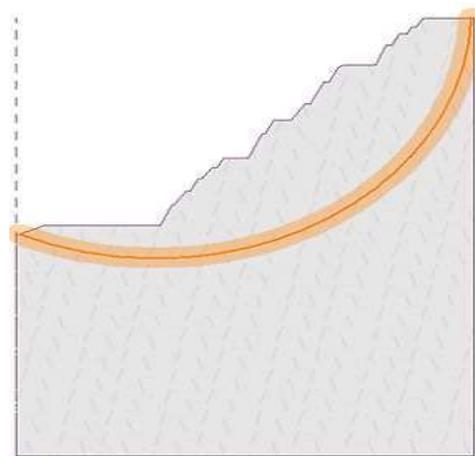


Slope stability analysis successfully completed.

Analysis settings : **standard**

Factor of safety FS = 3.19

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	ϕ_{ef} [°]	c_{ef} [kPa]
1	22.91	29.18



vert to polygon

Slope stability verification (all methods)

Bishop : FS = 3.88 > 1.50 **ACCEPTABLE**

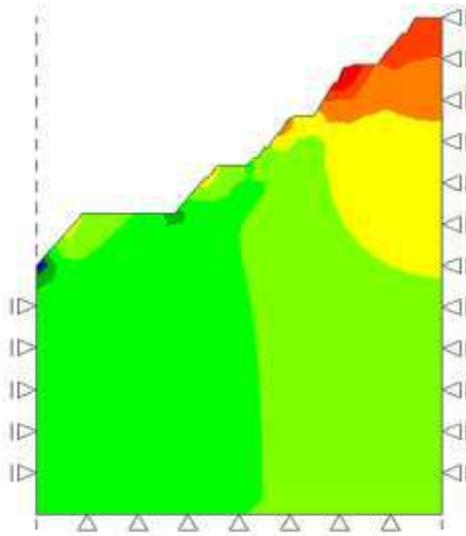
Fellenius / Petterson : FS = 5.86 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Spencer : FS = 7.13 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Janbu : FS = 7.17 > 1.50 **ACCEPTABLE**

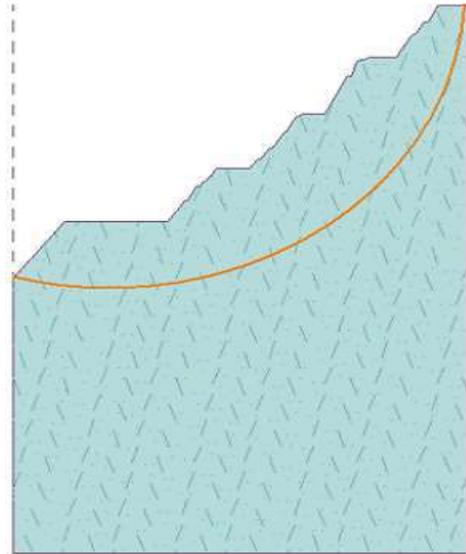
Morgenstern-Price : FS = 7.17 > 1.50 **ACCEPTABLE**

Talud 15



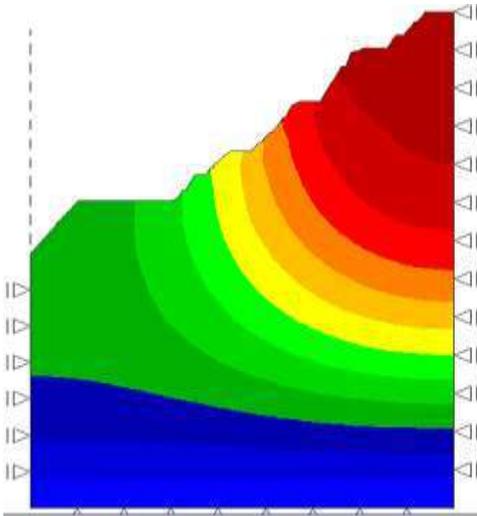
Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis settings : **standard**
Factor of safety FS = 2.87

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	Φ_{ef} [°]	C_{ef} [kPa]
1	23.36	39.05



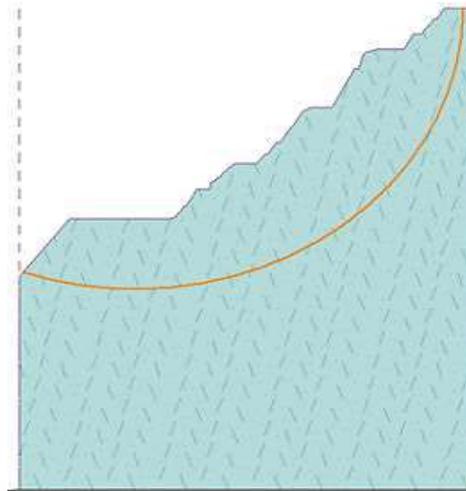
Slope stability verification (all methods)
 Bishop : FS = 3.97 > 1.50 ACCEPTABLE
 Fellenius / Petterson : FS = 4.38 > 1.50 ACCEPTABLE
 Spencer : FS = 5.28 > 1.50 ACCEPTABLE
 Janbu : FS = 5.31 > 1.50 ACCEPTABLE
 Morgenstern-Price : FS = 5.31 > 1.50 ACCEPTABLE

Talud 16



Slope stability analysis successfully completed.
 Analysis settings : **standard**
Factor of safety FS = 2.79

Soil parameters in the last finished iteration		
Region number	Φ_{ef} [°]	C_{ef} [kPa]
1	25.84	61.36



Slope stability verification (all methods)
 Bishop : FS = 4.42 > 1.50 ACCEPTABLE
 Fellenius / Petterson : FS = 6.19 > 1.50 ACCEPTABLE
 Spencer : FS = 7.54 > 1.50 ACCEPTABLE
 Janbu : FS = 7.59 > 1.50 ACCEPTABLE
 Morgenstern-Price : FS = 7.59 > 1.50 ACCEPTABLE

Anexo 7: Evolución del factor de seguridad respecto a la variación de la cohesión

