

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



**ESTABILIDAD DE TALUDES Y REVEGETACIÓN EN EL CIERRE
FINAL DEL TAJO 1 DEL PROYECTO MARICIELO 2003 DE
ÓXIDO DE HIERRO - PUNO 2019**

TESIS

**PRESENTADA POR:
MILAGROS PUMA CCAJMA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO DE MINAS**

PUNO – PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA DE MINAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS

**ESTABILIDAD DE TALUDES Y REVEGETACIÓN EN EL CIERRE
FINAL DEL TAJO 1 DEL PROYECTO MARICIELO 2003 DE
ÓXIDO DE HIERRO – PUNO 2019**

TESIS PRESENTADA POR:

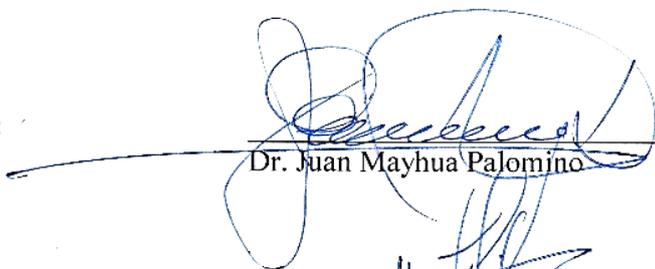
MILAGROS PUMA CCAJMA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

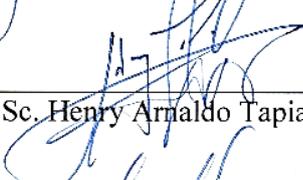
INGENIERO DE MINAS

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE:


Dr. Juan Mayhua Palomino

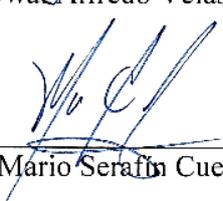
PRIMER MIEMBRO:


M. Sc. Henry Arnaldo Tapia Valencia

SEGUNDO MIEMBRO:


Ing. Owal Alfredo Velásquez Viza

DIRECTOR / ASESOR:


Mag. Mario Serafin Cuentas Alvarado

Área : Ingeniería de Minas

Tema : Cierre de Minas

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 06 DE NOVIEMBRE DEL 2019

DEDICATORIA

A Dios por ser el pilar fundamental que me sostiene, por guiarme y cuidarme en cada momento de mi vida.

De manera especial a mi familia que me apoyó, me apoya y apoyará, a mis padres: Juan Puma Quispe y a mi madre Casilda Ccajma Ccallo, que son las personas a quienes más admiro por su lucha constante; por haberme enseñado e inculcado en mí todos esos valores que hacen que sea una buena persona y su apoyo constante.

A mi hermana Silvia Benilda Puma Ccajma por acompañarme en mi vida estudiantil, brindarme toda su comprensión, darme los mejores consejos, a una persona muy especial.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios, por haberme brindado salud, fe, sabiduría necesaria y seres extraordinarios como lo son mi familia, quienes me apoyaron incondicionalmente.

Mi agradecimiento a la casa superior de estudios Universidad Nacional del Altiplano Puno, a la Facultad de Ingeniería de Minas, por mi formación académica, y a todos los docentes, que tal transcurrir de estos años me formaron y llenaron de diversos conocimientos, y nos ayudaron con el logro de nuestros objetivos y metas, con el fin de convertirme en una profesional al servicio de la sociedad.

Agradezco a mi asesor Mag. Mario Cuentas Alvarado por su gran apoyo y a todos los que me apoyaron en este proceso de realizar este proyecto de investigación.

Agradezco a mis buenos amigos, pasión, amor e ilusión soñadora que me motivan constantemente.

Milagros Puma Ccajma

ÍNDICE GENERAL**AGRADECIMIENTO****ÍNDICE GENERAL****ÍNDICE DE FIGURAS****ÍNDICE DE TABLAS****ÍNDICE DE ACRÓNIMOS**

RESUMEN	15
ABSTRACT	16

CAPÍTULO I**INTRODUCCIÓN**

1.1. Planteamiento del problema	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.2.1. Pregunta general	18
1.2.2. Preguntas específicas	18
1.3. Hipótesis de la investigación	19
1.3.1. Hipótesis general	19
1.3.2. Hipótesis específicos	19
1.4. Justificación de la investigación	19
1.5. Objetivos de la investigación.....	20
1.5.1. Objetivo general	20
1.5.2. Objetivos específicos	20

CAPÍTULO II**REVISIÓN DE LITERATURA**

2.1. Antecedentes de la investigación.....	21
2.2. Marco teórico.....	26
2.2.1. Mecánica de rocas.....	26
2.2.2. Tipos de talud	26

2.2.3.	Talud en rocas.....	27
2.2.4.	Propiedades físicas de los materiales rocosos	28
2.2.5.	Clasificación de Bieniawski (1973, 1976, 1989).....	29
2.2.5.1.	Ensayo uniaxial o de compresión simple.....	29
2.2.5.2.	Parámetro RQD	30
2.2.5.3.	Espaciamiento de discontinuidades	31
2.2.5.4.	Persistencia o continuidad	32
2.2.5.5.	Rugosidad	34
2.2.5.6.	Apertura	34
2.2.5.7.	Relleno de las discontinuidades.....	35
2.2.5.8.	Meteorización o alteración	36
2.2.5.9.	Agua en las discontinuidades	36
2.2.6.	Clasificación GSI (<i>Geological Strenth Index</i>).....	38
2.2.7.	Tipo de rotura	38
2.2.8.	Criterio de rotura	42
2.2.8.1.	Criterio de rotura de Barton – Bandis.....	42
2.2.9.	Calculo de coeficiente de seguridad.	44
2.2.10.	Estabilidad de taludes	46
2.2.10.1.	Métodos de estabilización de taludes rocosos	48
2.2.10.2.	Análisis de estabilidad de taludes en roca	50
2.2.11.	Condiciones de análisis de estabilidad de taludes	50
2.2.12.	Cobertura vegetal y revegetación	51
2.2.12.1.	Suelo fértil	53
2.2.12.2.	Preparación del terreno	56
2.2.12.3.	Revegetación	58
2.2.12.4.	Técnicas de bioingeniería en el tratamiento de los taludes	61
2.2.12.5.	Selección de especies vegetales y técnicas de implantación	62

2.2.12.6. Abonos orgánicos	66
2.3. Marco Conceptual.....	66

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico	69
3.1.1. Tipo de investigación.....	69
3.1.2. Diseño de investigación.....	69
3.2. Población y muestra.....	69
3.2.1. Población	69
3.2.2. Muestra	70
3.3. Definición de variables	70
3.3.1. Variable independiente	70
3.3.2. Variable dependiente	70
3.3.3. Operacionalización de variables	70
3.4. Técnicas	71
3.5. Instrumentos	72
3.6. Generalidades	76
3.6.1. Ubicación.....	76
3.6.2. Accesibilidad	76
3.6.3. Clima y meteorología	77
3.7. Geología.....	78
3.7.1. Geología regional	78
3.7.2. Geología local.....	81
3.7.3. Geomorfología.....	85
3.7.4. Hidrología.....	87
3.8. Fauna asociada a unidades de cobertura vegetal	87

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Caracterización estructural de la zona de estudio.....	90
4.1.1.	Aspectos litológicos.....	90
4.1.2.	Zonificación geotécnica.....	90
4.1.3.	Caracterización estructural	91
4.1.3.1.	Buzamiento.....	91
4.1.3.2.	Dirección de buzamiento	92
4.1.3.3.	Espaciamiento de estructuras.....	93
4.1.3.4.	Continuidad de estructuras	93
4.1.3.5.	Apertura de estructuras	94
4.1.3.6.	Rugosidad	94
4.1.3.7.	Relleno.....	94
4.1.3.8.	Meteorización de las juntas	95
4.1.3.9.	Agua en discontinuidades	96
4.1.3.10.	Angulo de fricción	96
4.1.3.11.	Cantidad de rebotes con martillo schmitd	96
4.1.4.	Caracterización geotécnica	97
4.1.4.1.	Índice de designación de la calidad de la roca (RQD).....	97
4.1.4.2.	Sistema de clasificación de Bieniawski(1973)	97
4.1.4.3.	Sistema de clasificación GSI	98
4.1.5.	Valoración geotécnica de estructuras.	98
4.1.5.1.	Criterio de resistencia generalizado Barton – Brandis.	98
4.1.6.	Valoración de roca intacta.	99
4.1.6.1.	Propiedades físicas	99
4.1.6.2.	Propiedades de resistencia	100
4.2.	Análisis de estabilidad de taludes	102

4.2.1.	Análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático.....	103
4.2.2.	Análisis de estabilidad por el método equilibrio límite o analítico.	106
4.3.	Identificación de la cobertura	110
4.3.1.	Clima	110
4.3.2.	Descripción de las características físicas del suelo.....	110
4.4.	Selección de la especie vegetal.....	118
4.5.	Discusiones.....	125
	CONCLUSIONES	131
	RECOMENDACIONES	133
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
	ANEXOS	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Talud artificial	27
Figura 2. Talud natural	27
Figura 3. Probeta preparada para ensayo de compresión simple.....	30
Figura 4. Medida de espaciado en una cara expuesta del afloramiento.....	32
Figura 5. Apertura de una discontinuidad.....	34
Figura 6. Rotura circular.....	40
Figura 7. Rotura plana.	40
Figura 8. Fuerzas actuantes sobre la superficie.	40
Figura 9. Rotura en cuña.....	41
Figura 10. Esquema de fuerzas actuando sobre los planos que forman la cuña.	41
Figura 11. Rotura por vuelco.	42
Figura 12. Perfiles normalizados para la obtención del JRC.....	43
Figura 13. Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca o de los labios de una discontinuidad a partir de las medidas con el martillo schmidt o esclerómetro.....	45
Figura 14. Mecanismos de rotura de taludes en macizos rocosos de naturales CHILE y DIANE.....	47
Figura 15. Distribución de ordenadas espectrales para el Perú correspondientes a un periodo estructural de 1.0 seg. con 5% de amortiguamiento y periodo de retorno de 475 años. Bolaños & Monroy, 2004	52
Figura 16. Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación.....	58
Figura 17. Formas de crecimiento de las plantas: herbáceas y matas.	64
Figura 18. Formas de crecimiento de las plantas: árboles y arbustos.....	64
Figura 19. Afloramiento del pórfido diorítico, alteradas con una coloración gris blanquecinas a pardas.	81
Figura 20. Contacto litológico, entrada al tajo.	82
Figura 21. Contacto de limolitas rojizas, limolitas gris violáceas y el intrusivo pórfido diorítico al NW del ingreso al tajo.....	83
Figura 22. Afloramiento de los depósitos de desmonte, al NW del tajo.	83
Figura 23. Tajo del yacimiento minero.....	85
Figura 24. Depósitos aluviales recientes.	86
Figura 25. Ichu.....	89

Figura 26. Simulación en 3D del área de estudio.	102
Figura 27. Vista de perfil del suelo de la zona 1.	112
Figura 28. Vista de perfil del suelo de la zona 4.	112
Figura 29. Muestras para caracterización.	114
Figura 30. <i>Medicago polymorpha</i>	120
Figura 31. <i>Stipa ichu</i>	121
Figura 32. <i>Senecio melanolepis</i>	122
Figura 33. <i>Erodium cicutarium</i>	122
Figura 34. <i>Lupinus</i>	123
Figura 35. <i>Sonchus oleraceus</i>	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calidad del macizo rocoso según el índice RQD.	31
Tabla 2. Descripción del espaciamiento de las estructuras.	33
Tabla 3. Descripción de la persistencia.	33
Tabla 4. Descripción de la apertura.	35
Tabla 5. Muestra la puntuación del relleno según el tipo de relleno.	35
Tabla 6. Descripción del grado de meteorización.	36
Tabla 7. Descripción de la condición de humedad de las estructuras.	37
Tabla 8. Conductividad eléctrica.	54
Tabla 9. Materia orgánica.	55
Tabla 10. Capacidad de intercambio atómico.	55
Tabla 11. Influencia de la pendiente de talud en el establecimiento de la cubierta vegetal.	59
Tabla 12. Clasificación de las técnicas de bioingeniería y estabilización biotécnica. ..	62
Tabla 13. Función de la revegetación.	63
Tabla 14. Operacionalización de variables de presente investigación.	70
Tabla 15. Área de investigación en coordenadas WGS84.	76
Tabla 16. Acceso al proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.	76
Tabla 17. Columna estratigráfica regional.	80
Tabla 18. Unidades de cobertura vegetal.	87
Tabla 19. Fauna presente en la zona del proyecto.	88
Tabla 20. Zonificación geotécnica.	91
Tabla 21. Buzamiento.	91
Tabla 22. Dirección de buzamiento.	92
Tabla 23. Espaciamiento de estructuras.	93
Tabla 24. Continuidad de estructuras.	94
Tabla 25. Apertura de estructuras.	94
Tabla 26. Rugosidad.	95
Tabla 27. Relleno.	95
Tabla 28. Meteorización de las juntas.	95
Tabla 29. Agua en discontinuidades.	96
Tabla 30. Cantidad de rebotes con martillo schmitd de roca pórfido diorítico.	96
Tabla 31. Cantidad de rebotes con martillo schmitd de roca limolita.	97

Tabla 32. Valores del RQD.....	97
Tabla 33. Valores del RMR.	97
Tabla 34. Valores de GSI.....	98
Tabla 35. Datos resistencia de la estructura por el criterio generalizado de Barton – Bandis.	99
Tabla 36. Resultado de densidad de roca intacta.	99
Tabla 37. Porosidad de rocas.	100
Tabla 38. Compresión simple de núcleos de roca.....	101
Tabla 39. Datos de entrada para el análisis de los modos de falla estructural a través de estereogramas en el software Dips v.6.0 de Rocscience.....	104
Tabla 40. Resultados del modo de falla planar.	104
Tabla 41. Resultados del modo de falla en cuña.....	105
Tabla 42. Resultados del modo de falla por vuelco flexural.....	105
Tabla 43. Resultados del modo de falla por vuelco directo.....	106
Tabla 44. Datos geométricos del talud, propiedades físicas y coeficiente sísmico para el análisis de estabilidad con el software RocPlane y Swedge.	107
Tabla 45. Datos de las propiedades de resistencia de las discontinuidades, para el análisis de estabilidad por rotura planar y cuña.....	107
Tabla 46. Resultados del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite de un talud por rotura planar con el software Rocplane de Rocscience.	108
Tabla 47. Resultados del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite de un talud por Cuña con el software Swedge de Rocscience.....	109
Tabla 48. Ángulos propuestos para zonas inestables.....	110
Tabla 49. Capacidad de uso mayor de tierras.	113
Tabla 50. Características del suelo.....	114
Tabla 51. Materia orgánica.	115
Tabla 52. pH.....	115
Tabla 53. Fósforo aprovechable.....	116
Tabla 54. Capacidad de intercambio atómico.....	116
Tabla 55. Bases intercambiables.....	116
Tabla 56. Saturación por bases.	117
Tabla 57. Conductividad eléctrica.	117
Tabla 58. Especies de flora existentes en el tajo.....	119

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RMR	: Clasificación de la masa rocosa
RQD	: Índice de calidad de la roca
GSI	: Índice de resistencia geológico
JRC	: Coeficiente de rugosidad de la junta
DIP	: Buzamiento
Dip Dir	: Dirección de Buzamiento
Vmax	: Valoración máxima
Vmin	: Valoración mínima
Prom	: Promedio
Vv	: es el volumen de vacíos
Vt	: es el volumen total.
Km	: Kilometros
Hrs	: Horas
ISRM	: Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas
JRC	: Coeficiente de rugosidad de la junta
σ_n	: Tensión normal actuando en la superficie de la unión de rocas
JCS	: Resistencia a la compresión conjunta
φ_b	: Ángulo básico de fricción interna de una superficie de deslizamiento
UCS	: Resistencia a la compresión uniaxial
UTM	: Universal Transverse Mercator (Sistema de coordenadas mundial)
EDM	: Medición topográfica de distancias.
GPS	: Global Position System.
WGS84	: Sistema geodésico mundial 1984.
mS/cm	: Mili Siemens por centímetro.
ppm	: Partes por millón.
me	: Mili equivalente.
M. O.	: Materia Orgánica.
C.I.C.	: Capacidad de intercambio atómico.
pH	: Potencial de hidrogeno.
Hp	: Horse power

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se realizó en el paraje de Chila del distrito de Tiquillaca, provincia y departamento de Puno, durante el año 2018 - 2019, se realizó el estudio a causa de existir inestabilidad de talud en el tajo 1 para un cierre de minas, generado por la explotación del mineral de óxido de hierro en minería a cielo abierto, que ocasiona riesgos al recurso humano y medio ambiente, el objetivo es la caracterización geotécnica de los taludes, analizar la estabilidad de taludes, luego identificar las características de la cobertura para su revegetación con especies que se adapten a condiciones ambientales de la zona. Tiene la metodología descriptiva que consiste en la caracterización geotécnica en campo considerando 4 zonas, se realizaron ensayos en campo y en laboratorio; posteriormente utilizar ábacos geotécnicos, datos como *Dip* y *Dip Dir* de las discontinuidades para el análisis cinemático en software *Rocscience (Dips)*, mediante el criterio de rotura de *Barton - Bandis*, se analizó en equilibrio límite de los taludes, datos obtenidos se ingresaron a los software *Rocscience (RocPlane y Swedge)* para obtener el valor del factor de seguridad para cada zona estudiada en condiciones estáticas y pseudoestáticas. Actualmente, la berma de la zona 1 posee cobertura de suelo, se caracterizó y se identificó las especies. Los resultados determinaron que la zona 3 es inestable para el cual se planteó ángulo 53° para ser estable. Sin embargo, para realizar una revegetación los ángulos de talud final tienen que ser menores o iguales a 45° para la adaptación de una especie, para lo cual se propone que se tiendan los taludes de la zona 2 y 3 a ángulos de 45° , la especie *Stipa ichu* por la adaptarse a condiciones edáficas extremadamente adversos y en la berma *Lupinus* salvaje por ser tolerantes al frío.

Palabras Clave: Cierre de mina, estabilidad taludes, revegetación.

ABSTRACT

This research work was carried out in the place of Chila in the district of Tiquillaca, province and department of Puno, during the year 2018 - 2019, the study was carried out due to the existence of slope instability in the pit 1 for a mine closure , generated by the exploitation of iron oxide ore in open pit mining, which causes risks to human resources and the environment, the objective is the geotechnical characterization of the slopes, analyze the stability of slopes, then identify the characteristics of the coverage for its revegetation with species that adapt to environmental conditions in the area. It has the descriptive methodology that consists in the geotechnical characterization in the field considering 4 zones, field and laboratory tests were carried out; subsequently using geotechnical abacus, data such as Dip and Dip Dir of the discontinuities for the kinematic analysis in Rocscience software (Dips), using the Barton - Bandis break criteria, analyzed in a slope balance of the slopes, data obtained were entered into Rocscience software (RocPlane and Swedge) to obtain the value of the Safety Factor for each zone studied in static and pseudostatic conditions. Currently, the berm in zone 1 has ground cover, the species was characterized and identified. The results determined that zone 3 is unstable for which angle 53° was raised to be stable. However, to perform a revegetation, the final slope angles must be less than or equal to 45° for the adaptation of a species, for which it is proposed that the slopes of zone 2 and 3 be laid at 45° angles, the *Stipa ichu* species for adapting to extremely adverse edaphic conditions and in the wild *Lupinus* berm for being cold tolerant.

Key Words: Mine closure, slope stability, revegetation.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El yacimiento minero Maricielo 2003 es de origen magmático que se encuentra en la formación Ayabacas (Calizas), su cuerpo mineralizado es de óxido de hierro (hematita) y de forma irregular.

El proyecto Maricielo 2003 cuyo yacimiento de óxido de hierro fue explotado a cielo abierto, cuyo ciclo de minado fue la siguiente: a. arranque, b. acumulación y c. carguío. Debido a las condiciones del material encajonante del mineral, primero se realizó limpieza o desbroce del material (uso de excavadora y volquetes), para luego proceder al arranque del mineral metálico (el cual consistió en el uso del martillo hidráulico para romper el mineral macizo, no se usó de voladura), para luego ser acumulado y ser cargado de forma directa con la excavadora a oruga, el proyecto tuvo una producción metálica aproximado de 20 000 toneladas anuales (producción esporádica por años), la comercialización se realizó al mercado local por ser usado como agente para la fabricación de cemento.

Asimismo, la explotación del yacimiento óxido de hierro no se realizó con un plan de explotación minera basada en criterios geotécnicos (lo que generó una pendiente muy elevada, donde existe desprendimiento de roca de la cabeza del talud), lo que produjo transformaciones topográficas, en la geomorfología del terreno, cambios en el paisaje, cambios en la resistencia de la roca, creando condiciones que no permitan el uso posterior a la actividad minera, asimismo presenta problemas de inestabilidad. En consecuencia, no contamos con información geotécnica de línea de base, lo cual dificulta las planificaciones

a realizar respecto a la estabilización de taludes para un cierre de minas. En la actualidad el ángulo de inclinación máxima del talud final es de 74° aproximadamente.

Con el desarrollo de la presente investigación, se realizará con el objeto de prevención, minimización y control de riesgos para la seguridad de las personas y del medio ambiente, que pudieran derivarse del cese de las operaciones mineras del proyecto de explotación (MINEM, 2005). Por lo cual surge la necesidad de determinar los ángulos finales de talud para la estabilidad de taludes, e identificación de la cobertura y la revegetación en el cierre final del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro. Ya cumplidos los parámetros establecidos en el cierre, se debe de afirmar que se realizó un cierre legal y que los impactos negativos fueron remediados. (García, et al 2014)

Una de las limitaciones para la rehabilitación de los impactos ambientales asociados a las actividades mineras es la falta de materia orgánica y los nuevos suelos originados tras la actividad minera. (Moreno & Quiroz, 2018).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Pregunta general

¿Cuáles son los ángulos de talud final para su estabilidad y la revegetación en el cierre final del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro?

1.2.2. Preguntas específicas

- ¿Cuáles son las características geotécnicas para la estabilidad de talud final del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro?
- ¿Cuáles son las características de la cobertura del talud para su revegetación con especies adecuadas del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro?

1.3. Hipótesis de la investigación

1.3.1. Hipótesis general

Determinando los ángulos aproximados a 45° de talud final se estabilizará y es adecuado para su revegetación del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

1.3.2. Hipótesis específicos

- Determinando las características geotécnicas se estabilizará los taludes del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.
- Identificando las características de la cobertura del talud con una adecuada selección de especies mejorará la visión del paisaje y evitará la posible erosión de los taludes del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

1.4. Justificación de la investigación

El agotamiento de las reservas explotadas económicamente, conlleva a realizar un plan de cierre de minas, con el propósito de prevención, minimización y control de riesgos para la seguridad de las personas y del medio ambiente, que pudieran derivarse del cese de las operaciones mineras del proyecto de explotación MINEM (2005), inmerso en el plan de cierre se desarrolla la estabilidad física del tajo para darle un comportamiento estable a largo plazo, evitando el desplazamiento del talud.

El motivo del presente trabajo de investigación de tesis tiene la finalidad de realizar un estudio geotécnica de los taludes para un plan de cierre de minas del tajo para conocer si son estables.

Además, tiene la finalidad de identificar las características de la cobertura y la vegetación para poder realizar la rehabilitación del área que ha sido afectado por la extracción del mineral de óxido de hierro.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Determinar los ángulos del talud final para su estabilidad y la revegetación en el cierre final del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las características geotécnicas para la estabilidad de talud del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.
- Identificar las características de la cobertura del talud para su revegetación con especies del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes de la investigación

Morales (2009) “El análisis determinístico, según modo de falla para cada uno de los perfiles, entrega factores de seguridad mayores a 1,3 en todos los casos al considerar el ángulo global de diseño. Al forzar que cada ángulo sea el definido por un FS igual a 1,3 encontramos que los perfiles 6, 9, 10 y 11 presentan un valor significativamente más bajo que los demás.”.

Valeriano (2016) indica que ha clasificado en cuatro los métodos de análisis de estabilidad de taludes en roca, los cuales son; empírico, estereográfico o cinemático, equilibrio límite o analítico y numérico. Cada uno de los métodos de análisis de estabilidad de taludes en roca, tienen características peculiares, ofreciéndonos bondades y debilidades. El método cinemático o estereográfico utiliza parámetros como la orientación de familias principales, ángulo de talud y dirección de buzamiento de corte del talud, es el método que sirve para definir los modos de falla más recurrentes en el talud, con éste no calculamos factores de seguridad solo porcentajes de predisposición de las estructuras a fallar por un modo de falla típico.

Medina (2014) alude “El diseño de los taludes del futuro Tajo Chapi Sulfuros se ejecutó utilizando toda la información disponible, realizando en una primera etapa un análisis cinemática a fin de identificar los mecanismos de falla a través de las fracturas naturales de la masa rocosa, y en una segunda etapa realizando los análisis de estabilidad y el diseño de los taludes, utilizando métodos de cálculo apropiados para los mecanismos de rotura identificados y tomando como base el diseño geométrico del tajo suministrado

por Compañía Minera Milpa S.A.A. Previo a los análisis de estabilidad se establecieron las condiciones de análisis”.

Molina (2004) menciona: “Otro de los contribuyentes de la inestabilidad del talud, es la presencia de los suelos con bajos valores de cohesión y ángulo de fricción, aminorando la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos”, “la infiltración de agua en el talud es uno de los principales factores desestabilizantes del talud”.

Calderón, (2016) el objetivo fue controlar la inestabilidad de taludes en mina a tajo abierto en Cajamarca, mediante la aplicación de las técnicas de ingeniería podrá controlar la inestabilidad de taludes en tajos de minería a tajo abierto, se llegaría a incrementar la estabilidad de taludes finales en el proceso de cierre de mina, se propone la aplicación de diversas técnicas de control de inestabilidad como, perfilado con maquinaria pesada, técnicas de control de la perforación y voladura asociados, se identificó los factores que producen inestabilidad de taludes en tajos abiertos, los cuales son: influencia de aguas superficiales y subterráneas, actividades de perforación y voladura, condiciones de discontinuidades, efectos sísmicos, calidad del macizo rocoso.

Sobarzo, et al (2011) presentada una metodología de análisis de taludes en areniscas meteorizadas de la formación Quiriquina, concluyó que es fundamental contar con antecedentes geológicos que permitan caracterizar los posibles planos de deslizamiento y el grado de meteorización del macizo rocoso. Es necesario determinar los valores de las propiedades geomecánicas del material por donde se espera que ocurra un deslizamiento.

Capucho (2010) el ángulo de la pendiente final representa la optimización de la economía y la seguridad de las excavaciones mineras. En consecuencia, el estudio de la estabilidad de la pendiente en una minería a cielo abierto implica la determinación de la geometría de la excavación con acceso directo al mineral de interés y con la mayor seguridad posible con el objetivo de la evaluación determinista de la estabilidad de taludes en la mina Tapira.

Menezes (2014) el mapeo geológico y geotécnico de la masa rocosa permitió identificar y evaluar las regiones de la mina en términos de parámetros geomecánicos, se realizó análisis cinemáticos para determinar la probabilidad de rotura de cuña, inclinación plana y de bloque en las pendientes, para estos mismos modos de ruptura, se realizaron análisis cinemáticos para pendientes hipotéticas, variando el azimut y el ángulo de la pendiente, con el fin de respaldar un análisis rápido de la probabilidad de ocurrencia de ruptura y la consolidación de los resultados fue posible verificar la alta resistencia de la roca intacta; sin embargo, debido al grado de fractura de la masa rocosa, su resistencia calculada a partir de la clasificación RMR es baja.

Díaz y Rodríguez (2017) estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 95 al 97 de la carretera Ciudad de Dios – Cajamarca, según los parámetros ingenieriles que definen la estabilidad de taludes en roca, muestran valores de factor de seguridad (FS) entre 0.68 a 1.12 para condiciones estáticas y de 0.54 a 0.94 para condiciones pseudoestáticas; indicando que la zona estudiada es potencialmente inestable, lo cual se puede corroborar cuando una pasa por ese sector, existiendo deslizamientos continuos de bloques de roca especialmente durante las épocas de lluvia.

Carhuaricra (2019) tuvo como objetivo en aplicar la normativa de D.S. N° 033-2005 EM con la técnica de recopilación de datos a nivel técnico, donde la revegetación tiene una especie nativa con crecimiento rápido y recubrimiento perenne denominada ichu (*Stipa ichu*), la conclusión fue de realizar un adecuado manejo ambiental y revegetación de la zona de influencia.

García, et al. (2014) menciona en sus resultados: El elemento paisaje es el más afectado por la explotación y abandono de la cantera por haber perdido su geoforma inicial y el resultado demuestra que la importancia es de orden moderado y crítico. Elemento flora presentan un máximo de remoción de cobertura vegetal por la cual se define de importancia severa, por la cual se requiere un trabajo para restaurar la zona. Y proponen la remediación y restauración: estabilización de taludes y recuperación de la capa orgánica, una vez recuperados las geoformas iniciales la implantación de biomantos para la regeneración de la capa orgánica.

Geraldo, et al (2019) el objetivo fue presentar las especies y familias de plantas más utilizadas en la recuperación de áreas degradadas en las actividades de explotación de mineral de hierro con conclusión: En el proceso de recuperación con el uso de la naturaleza florística influyen en el éxito o la disminución de la recomposición. El clima, el alivio, la estructura del suelo, la composición química, la iluminación y la disponibilidad de agua son algunos factores que pueden interceptar con la dinámica de recuperación. Aplicar la especie directamente al suelo, que se realicen estudios de las regiones para la corrección previa de las no conformidades, y el estudio es fundamental en la toma de decisiones técnicas y especies a utilizar. Las especies más encontradas fueron: frijoles guandu, bragatinga, eucalipto, hierba, brachiaria, pau brasil, árnica

mineira y hierba mofeta. Las familias más citadas fueron Fabaceae, Asteraceae, Melastomataceae y Orchidaceae.

Paradelo (2013) durante las actividades mineras, los perfiles originales de los suelos son destruidos y la exposición a las condiciones de la superficie se produce meteorización acelerada que da a lugar a suelos. Llegando a la conclusión: las propiedades físicas, químicas y biológicas son un problema para el desarrollo de la vegetación natural durante las labores de rehabilitación, siendo el factor limitante la materia orgánica, con un incremento de materia orgánica mejorará las propiedades físicas y la capacidad de retención de agua, aporta nutrientes como el P y N, incrementa la actividad biológica.

Tácuna (2016) concluyó que la revegetación de pastizales pobres con material esquejes de gramíneas nativas obteniendo mejor resultado con *Festuca humilior* y la incorporación de materia orgánica en forma de orina y estiércol de ovino es una estrategia efectiva para mejorar la condición y función hidrológica del pastizal.

Zapana, (2019) en los pastizales naturales de la comunidad Chila (1200 ha) se ha identificado siete sitios de especies vegetales dominantes las que han sido debidamente descritas *Distichlis humilis* (21,67 %), *Muhlenbergia fastigiata* (26,25 %), *Festuca dolichophylla* (13,58 %), *Stipa sp* (9,34 %), *Festuca dichoclada* (9,16 %) así como, *Stipa ichu* (10,83 %) y *Gnaphalium sp.* (9,17 %).

Mamani (2005) *Stipa ichu* tiene como habitat en suelos descubiertos, algo degradados y pajonales, indica suelos pobres, se adapta a planicie y ladera, el perfil modal de suelos Inca Huyo con predominancia de *Stipa Ichu* posee una fisiografía de ladera alta

con una pendiente de 1- 5% ligeramente inclinado, con un horizonte A de 0-12 cm, con pH de 7.1, con raíces finas y medias contenido mediano de materia orgánica (3.5).

2.2. Marco teórico

2.2.1. Mecánica de rocas

La mecánica de rocas se ocupa del estudio teórico, práctico de las propiedades y comportamiento mecánico de los materiales rocosos, y de su respuesta ante la acción de fuerzas aplicadas en su entorno físico. (González, 2004)

Las masas rocosas aparecen en la mayoría de los casos afectados por discontinuidades o superficies de debilidad que separan bloques de matriz rocosa o “roca intacta” constituyendo un conjunto de macizos rocosos. Ambos ámbitos son objeto de estudio de las mecánicas de rocas, pero son principalmente los planos de discontinuidad los que determinan el carácter diferencial de esta disciplina con respecto al estudio de los suelos, y los que hacen que la mecánica del medio rocoso presente un carácter discontinuo y anisótropo. (González, 2004)

2.2.2. Tipos de talud

Un talud o ladera, es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. Técnicamente se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural, y talud cuando se conformó artificialmente. (Suarez, 1998). Ver Figura 1.

Los taludes artificiales en roca son el producto de excavaciones realizadas para abrir espacio para rutas de transporte, edificios, centrales eléctricas, presas y portales de túneles. Son taludes "permanentes" en los cuales es necesario prevenir, o al menos

controlar los movimientos de roca. Sin embargo, incluso taludes de roca "temporales", como son los usados en canteras y en operaciones de construcción, pueden tener porciones que requieren la prevención de fallamientos o deslizamientos por un largo periodo. Además, algunos taludes diseñados sólo para uso temporal terminan cobrando vida propia como parte integral del paisaje, colindantes con desarrollos de viviendas o complejos industriales. (Guillén, 2004). Ver Figura 2.

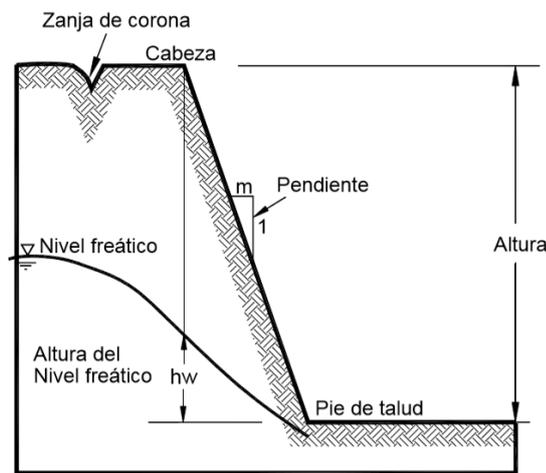


Figura 1. Talud artificial

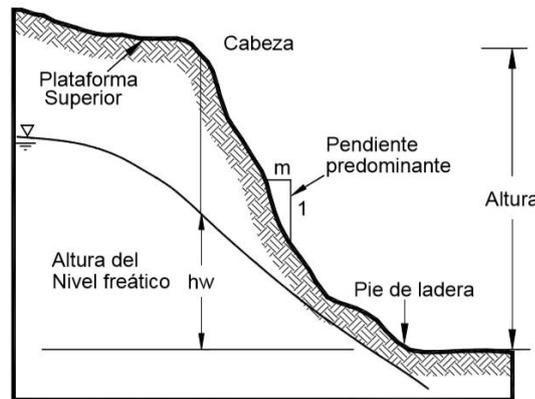


Figura 2. Talud natural

2.2.3. Talud en rocas

Es importante señalar que un talud en rocas en la superficie y una excavación en el subsuelo, son dos ambientes claramente distintos, siendo el talud en la superficie generalmente menos seguro. Aunque una persona puede sentirse más expuesta al peligro trabajando en el subsuelo, debido a los peligros que implican el trabajar en un ambiente

cerrado, las excavaciones en la superficie tienden a ser menos estables debido a que se tienen esfuerzos bajos, materiales con grados de intemperismo más elevados y a la acción del agua. (Guillén, 2004)

Generalmente, una excavación abierta incluye rocas intemperizadas, cuyas resistencias son mucho menores que la de la roca intacta. Algunas rocas blandas continuarán degradándose debido a alteraciones durante la construcción y posteriormente debido a la acción del agua y del clima, particularmente en regiones con climas cálidos y húmedos. (Guillén, 2004)

Tanto en la superficie como en el subsuelo, las presiones hidráulicas en discontinuidades y las presiones de poro en rocas fisuradas, estratos de rocas sedimentarias blandas o en el material poroso de relleno de las fallas (el cual se comporta como suelo) pueden con toda seguridad desestabilizar un macizo rocoso. Durante tormentas, las excavaciones en la superficie también tendrán que enfrentarse a problemas debidos a la pérdida de presión capilar o al ablandamiento de materiales arcillosos que inicialmente se encuentran en un estado no-saturado o disecado. Similarmente, la erosión, tanto interna como externa de materiales limosos derivados de la meteorización, típicos en suelos residuales, pueden llevar a una rápida destrucción del talud. (Guillén, 2004)

2.2.4. Propiedades físicas de los materiales rocosos

Las propiedades físicas o propiedades índice de las rocas se determinan en laboratorio, la más importante a nivel de influencia en el comportamiento mecánico son la porosidad, el peso específico, la permeabilidad, la alterabilidad, la resistencia y la velocidad de propagación de las ondas sónicas. Alguna de estas propiedades, además de

servir para su clasificación, están directamente relacionadas con las características resistentes y deformaciones de las rocas.(González, 2004)

2.2.5. Clasificación de Bieniawski (1973, 1976, 1989)

Para determinar la calidad del macizo rocoso, se divide este en dominios estructurales, es decir, en zonas delimitadas por discontinuidades geológicas dentro de los cuales la estructura es prácticamente homogénea. La estructura del macizo comprende el conjunto de fallas, diaclasas, pliegues y demás características geológicas propias de una determinada región. El índice que define la clasificación es el denominado RMR (Rock Mass Rating), que evalúa la calidad del macizo rocoso a partir de los siguientes parámetros:

- Resistencia a la compresión simple del material rocoso.
- Grado de fracturación en términos del índice RQD.
- Espaciamiento de las discontinuidades.
- Condiciones de las discontinuidades.
- Condiciones hidrológicas.

La incidencia de estos parámetros en el comportamiento geomecánico de un macizo se expresa por medio del índice de calidad RMR, que varía entre 0 a 100.

2.2.5.1. Ensayo uniaxial o de compresión simple

El ensayo de compresión uniaxial es sin duda el ensayo más usado e importante en cualquier investigación de mecánica de rocas. Este ensayo se restringe a aquellos materiales rocosos que son duros, irrompibles y que permiten su preparación. Para este ensayo se preparan cuerpos de prueba de material rocoso de forma cilíndrica a partir de bloques de muestras o de núcleos extraídos de las perforaciones.(Suarez, 2015). Ver Figura 3.

La resistencia a la compresión simple es un ensayo para la clasificación de la roca por su resistencia y para la determinación de su deformabilidad. La relación entre los esfuerzos aplicados en el ensayo es: $\sigma_1 \neq 0$; $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$. (Oyanguren & Leandro, 2004), para la compresión simple se utiliza la probeta como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Probeta preparada para ensayo de compresión simple.

2.2.5.2. Parámetro RQD

La fracturación del macizo rocoso está definida por el número, espaciado y condiciones de las discontinuidades, cualquiera que sea su origen o clase. El grado de fracturación se expresa habitualmente por el valor de índice RQD (Rock quality designation). (González, 2004)

Hay dos metodologías a seguir para el cálculo de RQD, una la de Priest y Hudson, que emplea las de las fracturas por metro lineal. Y la segunda, la de Palstrom, que emplea el índice volumétrico J_v . (Bordehore, 2010)

Priest y Hudson

Tomamos una línea con cinta métrica en el entorno de la estación geomecánica o entre varias de ellas alineadas (tomaremos en general tantas como zonas diferenciadas estimemos, aunque habitualmente será suficiente con un par de ellas si el macizo es muy semejante en toda la longitud investigada).

Medimos todas las juntas que interceptan nuestra línea “grosso modo” y la dividimos por la longitud de la línea, siendo este el parámetro “ λ ”. Para la determinación del RQD del macizo podemos emplear dos formulaciones las cuales requieren unos parámetros “de campo” diferentes. Nosotros de momento nos limitaremos a aplicar la formulación de Priest y Hudson que requiere de λ (juntas por metro lineal).

$$RQD = 100 \exp^{-0.1\lambda} (0.1\lambda + 1)$$

Donde λ es la inversa del espaciado medio de las discontinuidades.

$$\lambda = \frac{\text{número de discontinuidades}}{L \text{ (m)}}$$

o

$$\lambda = \frac{1}{\text{espaciado medio de discontinuidades (m)}}$$

Tabla 1.

Calidad del macizo rocoso según el índice RQD.

RQD %	Calidad
<25%	Muy mala
25-50%	Mala
50-75%	Media
75-90%	Buena
90-100%	Muy Buena

Fuente: González, 2004

2.2.5.3. Espaciamiento de discontinuidades

El espaciado se define como la distancia entre los dos planos de discontinuidad de una misma familia, medida en la dirección perpendicular a dichos planos. Normalmente

este valor se refiere al espaciado medio o modal de los valores medidos para las discontinuidades de una misma familia. Ver Tabla 2.

La medida del espaciado se realiza con una cinta métrica, en una longitud suficientemente representativa de la frecuencia de discontinuidades, al menos de 3 metros. (González, 2004). El procedimiento a seguir es la siguiente, para familia de discontinuidades:

- Elegir una superficie de afloramiento o una pared excavada y medir la orientación de cada una de las superficies.
- Definir una línea de trabajo, donde se colocará en forma paralela la cinta métrica, de tal manera que las trazas de la familia de discontinuidades a ser medidas sean lo más perpendiculares a ella.

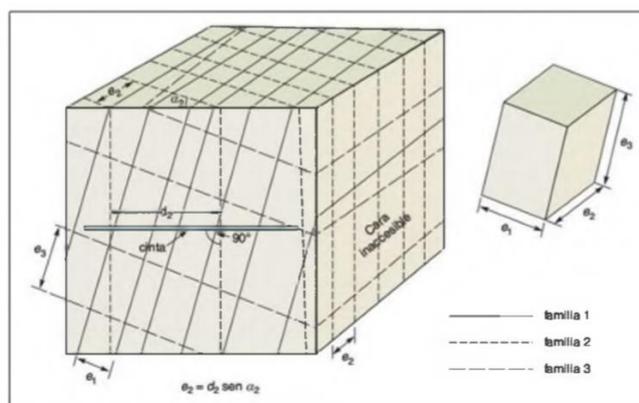


Figura 4. Medida de espaciado en una cara expuesta del afloramiento.
Fuente: ISRM, 1981

2.2.5.4. Persistencia o continuidad

La continuidad o persistencia de un plano de discontinuidad en su extensión superficial, medida por la longitud según la dirección de plano y según su buzamiento. Es un parámetro de gran importancia, pero de difícil cuantificación a partir de la observación de afloramientos, en los que normalmente se ven las trazas de los planos de discontinuidad según su buzamiento aparente. (González, 2004)

Tabla 2.

Descripción del espaciamiento de las estructuras.

Descripción	Espaciado (mm)
Extremadamente junto	<20
Muy junto	20-60
Junto	60-200
Moderadamente junto	200-600
Separado	600-2000
Muy separado	2000-6000
Extremadamente separado	>6000

Fuente: International society for rock mechanics commission on standarization of laboratory and field test, 1978.

Se deben diferenciar las discontinuidades que se extienden fuera del afloramiento de las que acaban dentro del mismo y de las que terminan contra otras discontinuidades, ya que una familia de juntas que se extienden fuera del afloramiento debe ser más persistente que otra en la que predominan las terminaciones contra otras juntas. Cuando los afloramientos donde se realizan las observaciones son de poca extensión puede ser imposible estimar correctamente las dimensiones de las discontinuidades. (Oyanguren & Leandro, 2004). Ver Tabla 3.

Tabla 3.

Descripción de la persistencia.

Término	Continuidad en m
Muy baja	<1
baja	1 - 3
Media	3 - 10
Alta	10 - 20
Muy alta	>20

Fuente: International society for rock mechanics commission on standarization of laboratory and field test, 1978.

2.2.5.5. Rugosidad

La descripción y medida de la rugosidad tiene como principal finalidad la evaluación de la resistencia al corte de los planos, τ , que para discontinuidades sin cohesión puede ser estimada a partir de datos de campo y de expresiones empíricas. La rugosidad aumenta la resistencia al corte, que decrece con el aumento de la abertura y, por lo general, con el espesor de relleno. (González, 2004)

La rugosidad puede ser medida en campo con diversos métodos, dependiendo de la exactitud requerida, de la escala medida o de la accesibilidad al afloramiento, incluyendo desde estimaciones cualitativas hasta medidas cuantitativas. El método más sencillo y rápido es la comparación visual de la discontinuidad con los perfiles estándar de rugosidad. (González, 2004)

2.2.5.6. Apertura

Distancia perpendicular entre las paredes de las discontinuidades. (IGME, 1987). Cuando este espacio intermedio tiene agua o aire. En esto se distingue la apertura del espesor del relleno. Ver Figura 5 y Tabla 4.

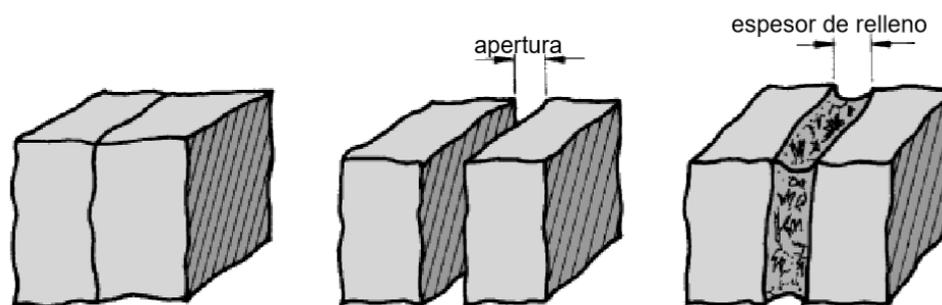


Figura 5. Apertura de una discontinuidad

Fuente: Diagramas que muestran la definición de la apertura de las discontinuidades y el ancho de las discontinuidades rellenas. De izquierda a derecha discontinuidad cerrada, discontinuidad abierta y discontinuidad rellena. ISRM, 198

2.2.5.7. Relleno de las discontinuidades

Se denomina relleno de una discontinuidad al material que ocupa el espacio entre sus labios. Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de un material de naturaleza distinta a las rocas de las paredes. Existen gran variedad de materiales de relleno con propiedades físicas y mecánicas muy variables.

Tabla 4.

Descripción de la apertura.

Apertura	Descripción (mm)
Cerrada	0
Muy angosta	< 0.1
Angosta	0.1-1.0
Abierta	1.0-5.0
Muy abierta	> 5.0

Fuente: ISRM, 1981

La presencia de relleno gobierna el comportamiento de la discontinuidad, por lo que deben ser reconocidos y descritos todos los aspectos referentes a sus propiedades y estado. Debe tenerse en cuenta que si se trata de materiales blandos o alterados, estos pueden sufrir variaciones importantes de sus propiedades resistentes a corto plazo si cambia su contenido en humedad o si tiene lugar algún movimiento a lo largo de las juntas. (González, 2004)

Tabla 5.

Muestra la puntuación del relleno según el tipo de relleno.

Relleno	Rango RMR
Ninguno	6
Relleno duro <5mm	4
Relleno duro >5mm	2
Relleno blando <5mm	1
Relleno blando >5mm	0

Fuente: Bieniawski, 1989

2.2.5.8. Meteorización o alteración

El grado de meteorización de la roca es una observación importante en cuanto que condición se forma definitiva sus propiedades mecánicas. Según avanza el proceso de meteorización aumenta la porosidad, permeabilidad y deformabilidad del material rocoso al tiempo que disminuye su resistencia. La identificación del estado o grado de meteorización de la matriz rocosa se puede realizar de forma sistemática a partir de las descripciones de la Tabla 6.

Tabla 6.
Descripción del grado de meteorización.

Término	Descripción
No meteorizada	No se observan signos de meteorización.
Ligeramente meteorizada	Las discontinuidades se encuentran manchadas o descoloridas y pueden contener un pequeño relleno producto de la alteración del material.
Moderadamente meteorizada	Leve decoloración extendida a lo largo de la discontinuidad. Las discontinuidades pueden contener relleno del material alterado. Parcialmente se pueden observar capas de granos.
Altamente meteorizada	Decoloración extendida a lo largo de la roca, y el material de roca es parcialmente friable, La textura original de la roca se mantiene y es preservada, pero va ocurriendo separación de granos.
Descompuesta	La roca se ha alterado al estado de un suelo, alguno o todos los minerales están descompuestos. El material se encuentra en una condición friable.

Fuente: Bieniawski, 1989

2.2.5.9. Agua en las discontinuidades

Generalmente, la circulación de agua en los macizos rocosos se realiza a lo largo de las discontinuidades (permeabilidad secundaria), excepto en las rocas sedimentarias

con un alto índice de poros, en las cuales el agua circula por la propia roca (permeabilidad primaria).(Oyanguren & Leandro, 2004)

Las observaciones con respecto a las filtraciones en discontinuidades, tanto si se presentan rellenas como si aparecen limpias, pueden seguir las descripciones de la Tabla 7, conforme a las recomendaciones de la ISRM.(González, 2004)

Tabla 7.
Descripción de la condición de humedad de las estructuras.

Condición	Estructuras sin relleno	Estructuras con relleno
I	Estructura cerrada y seca. No parece posible que a través de la misma circule agua.	El relleno esta húmedo pero sin señales de agua libre.
II	Estructura seca y sin evidencia de que haya permitido el flujo de agua.	El relleno esta húmedo pero sin señales de agua libre.
III	Estructura seca pero con evidencia de que ha permitido el flujo de agua.	El relleno está mojado y presenta goteos ocasionales.
IV	La estructura está húmeda pero no hay goteos ni otras señales de agua libre.	Se observa un flujo continuo de agua (estimar el caudal). El relleno puede mostrar señales de lavado.
V	La estructura presenta goteos ocasionales, pero sin un flujo continuo de agua.	Se observa flujo considerable de agua según “canales” preferentes (estimar el caudal y la presión). El relleno está localmente lavado
VI	La estructura muestra un flujo continuo de agua (estimar el caudal y la presión).	Se observa un flujo considerable de agua (estimar caudal y presión). El relleno ha sido, al menos localmente, completamente lavado.

Fuente: ISRM, 1981

2.2.6. Clasificación GSI (*Geological Strength Index*)

El GSI es un índice de calidad de macizos rocosos que ha sido desarrollado para poder estimar los parámetros m_b y s de la clasificación de *Hoek Brown* (1980). Dichos autores pensaron que un criterio de rotura de macizos rocosos no podía considerarse sólido si no relacionaba con una clasificación geomecánica. Aunque cuando se desarrolló este criterio de rotura existían ya las clasificaciones RMR (*Bieniawski*, 1973) y Q (*Barton et al.*, 1973), *Hoek y Brown* consideraron que estas habían sido creadas para estimar el sostenimiento en túneles y excavaciones subterráneas, por lo que incluyen parámetros que no son necesarios para estimar las propiedades de un macizo rocoso que debe ser incluidas en un criterio de rotura. (Oyanguren & Leandro, 2004)

La clasificación GSI se basa en una observación cuidadosa del macizo rocoso y, por consiguiente, es esencialmente cualitativa. Este índice incorpora la estructura del mismo y las características geotécnicas de las superficies de discontinuidades existentes en él y se obtiene a partir de un examen visual del macizo rocoso en afloramientos y sondeos. El GSI combina los dos aspectos fundamentales del comportamiento de los macizos rocosos, es decir: su fracturación, o sea, el tamaño y la forma de los bloques, y la resistencia al corte de las discontinuidades.

2.2.7. Tipo de rotura

En cualquier parte de la superficie terrestre la gravedad actúa continuamente sobre los materiales, que tienden a dirigirse hacia niveles más bajos. El termino más comúnmente usado para designar los movimientos producidos en los taludes es el de deslizamiento. Dicho termino implica movimientos de masas formadas por diferentes tipos de materiales: rocas suelos, rellenos artificiales o también combinaciones de los mismos, a través de una superficie determinada denominada de rotura. La velocidad con

que se desarrollaran las roturas de los taludes es variable, dependiendo de la clase de material involucrado en los mismos y del tipo de deslizamiento. (Oyanguren & Leandro, 2004)

Tipos de rotura desde el punto de vista mecánico:

- Roturas por deslizamiento según uno o varios planos de discontinuidad que afloran en el talud y que incluirán las roturas plana y en cuña.
- Roturas por movimiento relativo de bloques a través de planos de discontinuidad preexistentes que no afloran necesariamente y que incluirán las roturas por vuelco, algunas roturas que siguen discontinuidades paralelas al talud y las roturas de varios bloques.
- Roturas producidas parte por deslizamientos a lo largo de planos de discontinuidad y parte por rotura de la roca y que incluirán las roturas en escalón, roturas mixtas, roturas complejas (como roturas por deslizamiento y vuelco o el denominado “*kink band slumping*”) y otras roturas que siguen parcialmente discontinuidades paralelas al talud (rotura por pandeo).
- Roturas que se producen siguiendo una superficie circular, sin relación importante con los planos de junta, y que en términos generales se denominan roturas circulares.(Oyanguren & Leandro, 2004)

La rotura circular suele tener lugar en macizos rocosos de mala calidad o meteorizados o en suelos, en este caso la rotura por deslizamiento se produce siguiendo una trayectoria circular. Ver Figura 6.

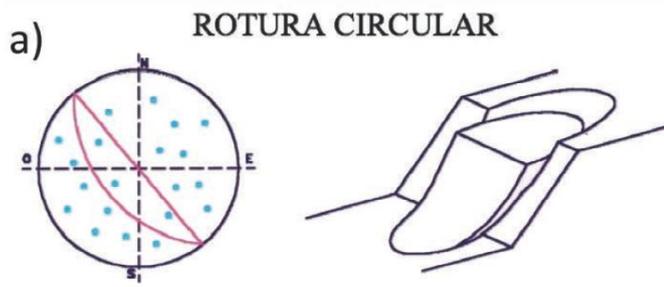


Figura 6. Rotura circular
Fuente: Arzúe et al, 2013

La rotura plana se produce siguiendo una discontinuidad con dirección aproximadamente igual a la del talud pero que buza menos que este, quedando descalzado por tanto un prisma de roca. Normalmente requiere superficies laterales de despegue. Ver Figura 7 y 8.

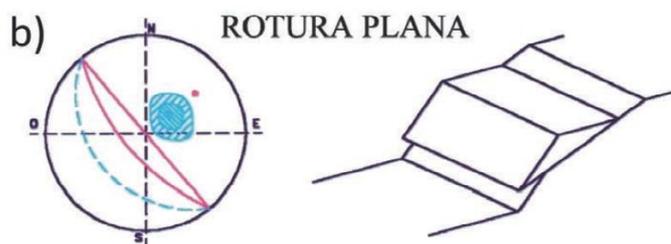


Figura 7. Rotura plana.
Fuente: Arzúe et al, 2013

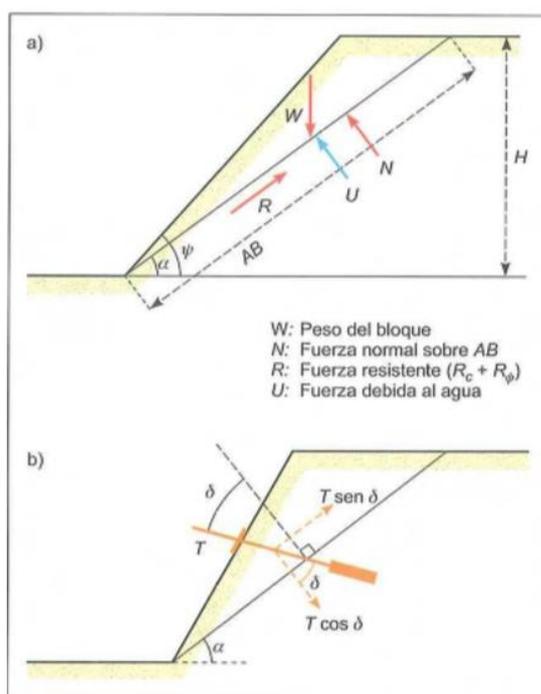


Figura 8. Fuerzas actuantes sobre la superficie.
Fuente: González, 2004

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{cA + (W \cos \alpha - U) \tan \phi}{W \sin \alpha}$$

Donde:

cA = Fuerza debido a la cohesión en el plano de deslizamiento.

$(W \cos \alpha - U) \tan \phi$ = Fuerza debido al rozamiento del plano.

$W \cos \alpha$ = Componente estabilizadora del peso (normal a la superficie de deslizamiento).

$W \sin \alpha$ = Componente del peso tendente al deslizamiento. fuerza deslizante.

$cA + (W \cos \alpha - U) \tan \phi$ = fuerza de resistencia.

U = Fuerza total debido a la presión de agua sobre la superficie de deslizamiento.

La rotura en cuña se produce siguiendo dos planos de discontinuidad, de manera que el buzamiento de la línea de intersección de ambos tenga el buzamiento inferior al ángulo de talud, lo que descalza un tetraedro o cuña de roca que podrá eventualmente deslizar. Ver Figura 9 y 10.

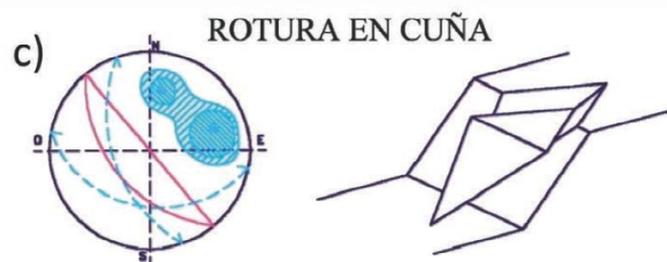


Figura 9. Rotura en cuña.
Fuente: Arzúe et al, 2013

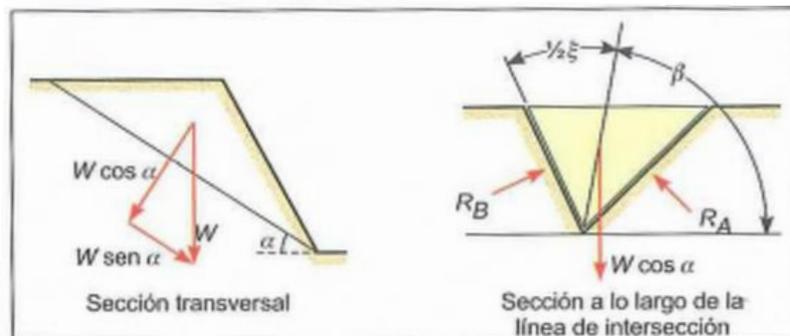


Figura 10. Esquema de fuerzas actuando sobre los planos que forman la cuña.
Fuente: Hoek & Bray, 1981

$$\text{Factor de Seguridad} = [(R_A + R_B) \operatorname{tg} \phi / W \operatorname{sen} \alpha$$

Donde:

α = es el ángulo de la línea de intersección con la horizontal.

La rotura por vuelco se produce si se tiene una familia de discontinuidades muy persistentes y relativamente poco espaciadas que tengan un rumbo paralelo al del talud (típicamente estratificación o esquistosidad), pero que bucen contra este con una inclinación mas bien alta. A veces este fenómeno se ve catalizado por la presencia de la otra familia de discontinuidades perpendicular a la anterior que permita la formación de una base escalonada sobre la que vuelquen las primas de la roca que se formen. Ver Figura 11.

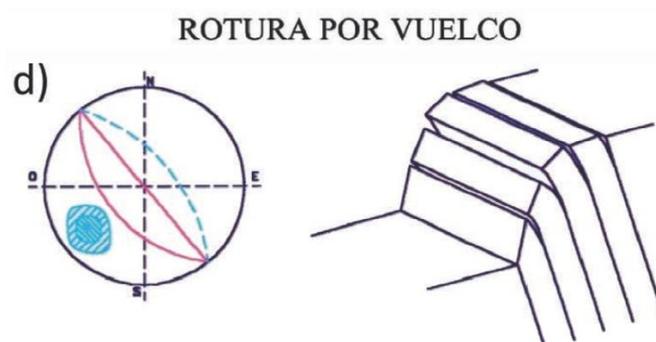


Figura 11. Rotura por vuelco.

Fuente: Arzúe et al, 2013

2.2.8. Criterio de rotura

2.2.8.1. Criterio de rotura de Barton – Bandis

El criterio de fallo de fuerzas de corte de Barton-Bandis para masas de rocas toma la siguiente forma:

$$\tau = \sigma_n \cdot \operatorname{tg} \left[\varphi_b + JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right]$$

Dónde: JRC - Coeficiente de rugosidad conjunta

σ_n - Tensión normal actuando en la superficie de la unión de rocas

JCS - Resistencia a la compresión conjunta

φ_b - Ángulo básico de fricción interna de una superficie de deslizamiento.

Rangos aproximados de los parámetros del criterio de fallo de Barton-Bandis están dados por los siguientes parámetros.

Parámetros de Barton-Bandis

Coefficiente de rugosidad conjunta JRC

Los perfiles de rugosidad conjunta de roca que muestra el típico rango de JRC se muestra en la figura 12.

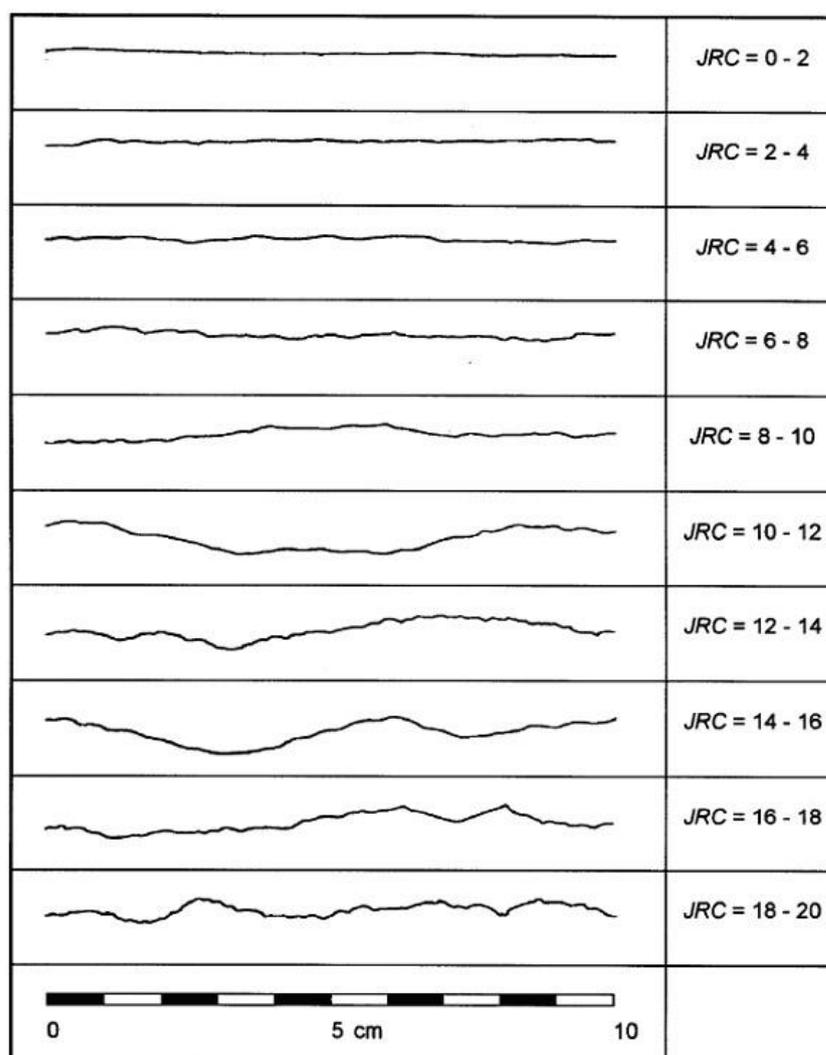


Figura 12. Perfiles normalizados para la obtención del JRC
Fuente: Barton y Choubey, 1977

Resistencia a la compresión de los labios de la discontinuidad o JCS

Se pueden obtener mediante la aplicación del martillo *Schmidt* sobre la discontinuidad y utilizando al ábaco de propuesto por *Miller* (1966), ver Figura 13. Para obtener este valor de resistencia JCS, conociendo el valor de rebotes R, medido en varios ensayos se aplica la expresión:

$$JCS = 10^{0.00088 \cdot \gamma \cdot R + 1.01}$$

Dónde: γ : Peso específico de la roca en KN/m³.

R : Numero de Rebotes del martillo Schmitd.

Ángulo básico de fricción interna en la superficie de deslizamiento ϕ_b

El valor básico del ángulo básico de fricción interna en la superficie de deslizamiento es se obtiene mediante el ensayo *Tilt test*, propuesta por *Stimpson* (1981), donde desarrolla ensayos de inclinación con tres testigos dejando que una de ellas se deslice sobre las otras dos y midiendo el ángulo de inclinación α en el momento que empiece a deslizarse, se calcula con la siguiente formula:

$$\phi_b = \tan^{-1} \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \tan \alpha \right)$$

Dónde: α : Angulo de inclinación.

Esta fórmula es de gran ayuda el modelo de *Barton-Brandis* de estimación de las propiedades de resistencia a las discontinuidades rugosas sin relleno.

2.2.9. Calculo de coeficiente de seguridad.

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza para que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña. (Suarez, 1998)

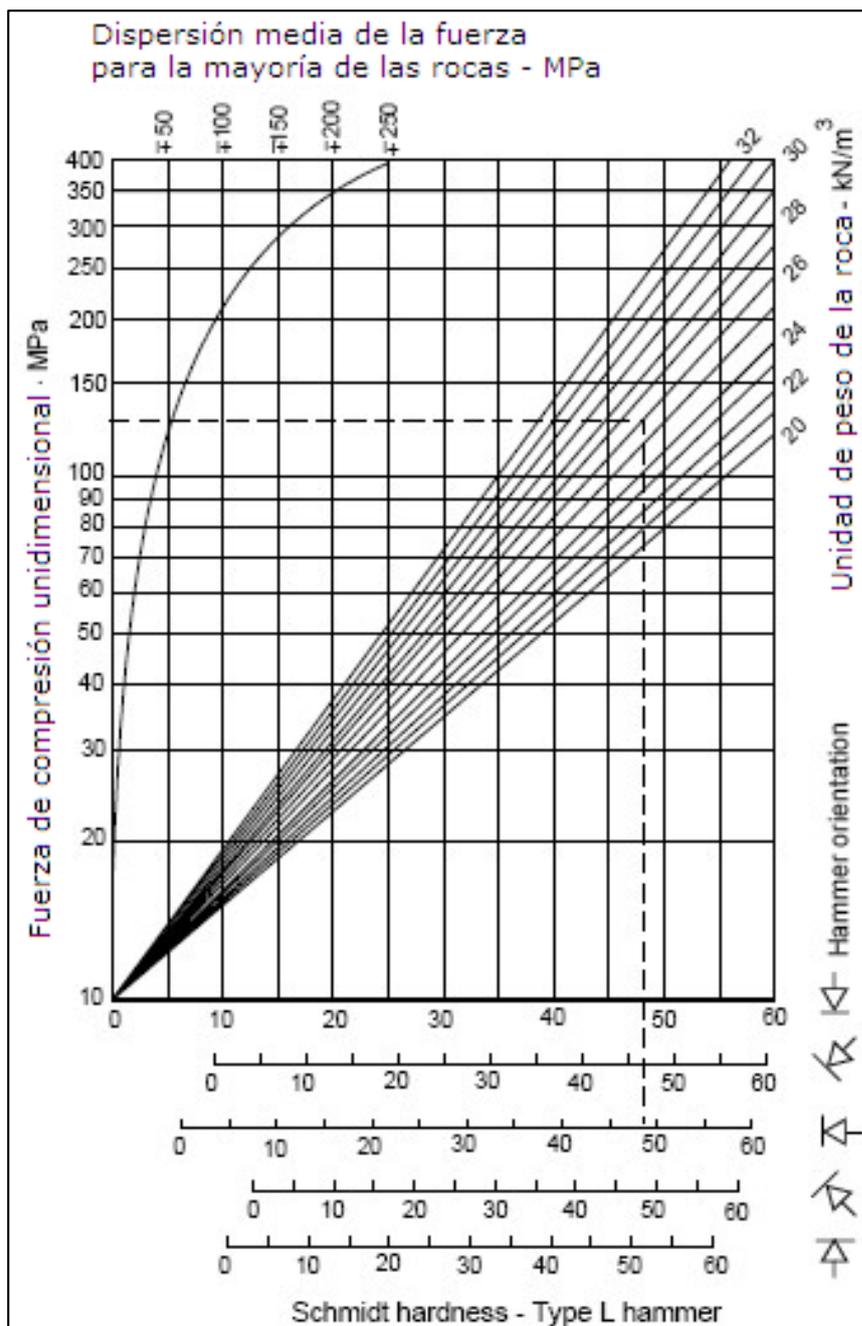


Figura 13. Ábaco para la obtención de la resistencia a compresión simple de una roca o de los labios de una discontinuidad a partir de las medidas con el martillo schmidt o esclerómetro.

Fuente: Miller, 1966

Cuando el coeficiente de seguridad de un talud bien calculado es inferior a 1, es muy probable que se produzca una rotura. En un caso determinado, se podrá dar esta circunstancia a partir de una cierta inclinación del talud. En la mayoría de los taludes mineros, donde solo es necesario garantizar la estabilidad durante un cierto tiempo

relativamente corto, mientras dura la operación minera, se considera suficiente un coeficiente de seguridad igual o superior a 1.2. Si se trata de garantizar la estabilidad de taludes a más largo plazo, hay que pensar en un coeficiente de seguridad del orden de 1.5. Mediante cálculos se podrá determinar el Angulo de inclinación del talud, en los casos que se encuentre seco o totalmente saturado, para alcanzar un determinado coeficiente de seguridad.(Oyanguren & Leandro, 2004)

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{\text{Fuerza resistentes}}{\text{Fuerza deslizantes}}$$

2.2.10. Estabilidad de taludes

En la mayor parte de los casos, el estudio de las inestabilidades de taludes no puede realizarse a nivel general, sino talud por talud, ya que las inestabilidades suelen ir asociadas a la presencia de discontinuidades concretas con orientaciones determinadas. La estabilidad de taludes suele estar muy condicionada por la presencia de agua, que en muchos casos es el factor determinante, ya que los coeficientes de seguridad suelen ser muy diferentes para un talud excavado en un macizo rocoso totalmente seco o totalmente saturado.

Factores que afectan a la estabilidad de taludes

Los factores principales que afectan en general a la estabilidad de los taludes pueden agruparse de la siguiente forma:

- Propiedades resistentes y deformaciones de las rocas.
- Características físicas y geométricas de las discontinuidades.
- Estado tensional.
- Geometría del talud, altura y ángulo, etc.
- Técnicas de construcción.

- Condiciones de agua subterráneo.
- Sistema de drenaje.
- Técnicas de refuerzo y sostenimiento.

La resistencia de la matriz rocosa y las propiedades deformacionales son importantes solamente cuando la rotura del talud puede tener lugar a través de la roca intacta (e. g. rotura circular en rocas homogéneas, o rotura plana a través de una discontinuidad existente y también de la roca intacta). Este sería el caso de los materiales denominados actualmente como el tipo de CHILE (Continuos, Homogéneos, Isótropos, Lineales-Elasticos). (López, 2002), Ver Figura 14a.

En los macizos rocosos diaclasados el comportamiento resistente y deformacional está controlado fundamentalmente por las propiedades de las discontinuidades. Por esto es fundamental una caracterización geoestructural precisa de los macizos rocosos. En este caso los materiales se denominan con los acrónimos DIANE (Discontinuos, Inhomogéneos, Anisotrópico, No-Elastico). (López, 2002). Ver Figura 14b.

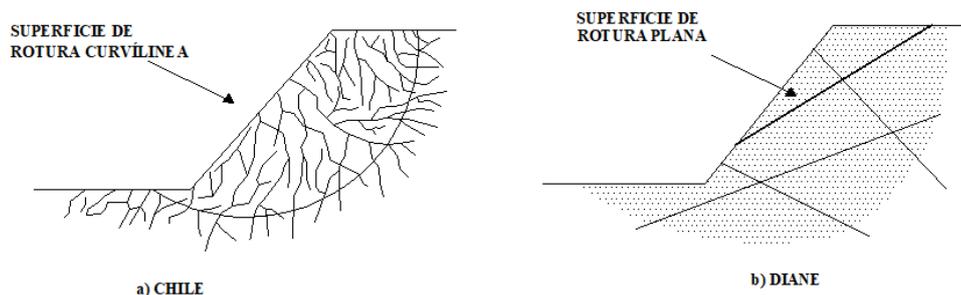


Figura 14. Mecanismos de rotura de taludes en macizos rocosos de naturales CHILE y DIANE

Fuente: (López, 2002)

Las técnicas de excavación pueden ser muy variadas, pero una aplicación inadecuada de alguna de ellas, muchas veces motivada por un supuesto ahorro de costes,

puede dar lugar a una afección negativa de las propiedades resistentes de los macizos remanentes, con la necesidad posterior de aplicar medidas correctoras de control y estabilización de un coste superior al citado ahorro de costes en la excavación. (López, 2002)

Los análisis de estabilidad deberán entonces evaluar los efectos de los elementos instalados y, a ser posible, su comportamiento a largo plazo. (López, 2002)

Estabilidad de taludes a largo plazo

Actualmente, los métodos tradicionales de diseño de taludes con los que se establece un determinado factor de seguridad, normalmente entre 1.2 y 1.3, están condicionadas a las condiciones reinantes a corto plazo, pero no evalúan la estabilidad a largo plazo.

Las causas principales que favorecen a una reducción de la resistencia al corte depende de los efectos estructurales de la roca y de la matriz rocosa o de la meteorización física y química como puede ser la desintegración de las rocas granulares (e.g. areniscas) bajo las acciones de las heladas o ciclos térmicos y fenómenos de disolución de la matriz cementante en areniscas y conglomerados. (López, 2002)

2.2.10.1. Métodos de estabilización de taludes rocosos

El principal problema en la excavación de taludes en roca se refiere a la estabilidad de los frentes definitivos. Existen tres formas características de rotura que se pueden reconocer en los macizos rocosos cada uno de ellos viene definido por el número de planos necesarios para delimitar la rotura y se dividen en roturas planares (en un plano), en cuña (dos planos) y por vuelco (en dos o tres planos). Estos modos de rotura son responsables de la mayoría de los desprendimientos de rocas en los taludes. (López, 2002)

Estabilización de taludes en roca

Medidas de retirada del material rocoso

La estabilización de los taludes rocosos puede conseguirse mediante la retirada de las rocas potencialmente inestables, se mencionan los métodos típicos de remoción de rocas.(López, 2002)

- Ataluzamiento, dando pendientes más suaves a las zonas con rocas inestables
- Saneado o perfilado de talud.

Ataluzamiento: procedimiento de diseño comienza con un análisis retrospectivo del talud inestable, si se mantiene en un factor de seguridad de 1.0, es posible calcular los parámetros de resistencia del macizo rocoso. Esta información puede ser empleada para determinar posteriormente los nuevos ángulos y/o alturas de talud que produzcan el adecuado factor de seguridad. Para la mayor parte de los taludes excavados el factor de seguridad empleado para mantener la estabilidad durante un largo periodo es de 1.5.(López, 2002)

Saneado del talud: esta operación se refiere a la retirada de las rocas sueltas, el suelo y la revegetación de la cara de un talud empleando herramientas manuales como palancas, palas, sierras mecánicas.

Drenaje

El drenaje superficial intenta evitar que las aguas superficiales se infiltren en el talud simultáneamente, evitar los efectos erosivos del agua de escorrentía que circula por la superficie de la excavación.(López, 2002)

2.2.10.2. Análisis de estabilidad de taludes en roca

Análisis de estabilidad de taludes por el método estereográfico o cinemático

La proyección estereográfica es una esfera que tiene una orientación fija de su eje relativo al norte y su plano ecuatorial, relativo a la horizontal. La localización de los puntos corresponde a una línea y la intersección de dos planos se define como una línea. Las proyecciones estereográficas se pueden presentar como puntos con sus respectivos símbolos o por medio de contorno de área. (Suarez, 1998)

2.2.11. Condiciones de análisis de estabilidad de taludes

Análisis de estabilidad estático; este análisis se refiere a la estabilidad de las estructuras proyectadas y la fundación sin considerar la acción sísmica.

El análisis de estabilidad pseudoestático; el método consiste en calcular el factor de seguridad contra deslizamiento, cuando una fuerza horizontal es igual al producto del coeficiente sísmico por el peso de la masa potencial de falla, la cual es adicionada a las fuerzas estáticas ya existentes.

Dentro del territorio peruano se han establecido diversas zonas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo a la mayor o menor presencia de los sismos. Esta sismicidad es principalmente producto de la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Continental a lo largo de la costa peruana. De acuerdo a Bolaños y Monroy (2004), En el mapa de la Figura 15, se puede observar que, para el área en estudio, los autores proponen una aceleración máxima de 0.33g.

Marcuson (1981) recomienda que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis en la condición pseudoestática de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre $1/2$ a $1/3$ de la máxima aceleración esperada.

Por lo tanto, para los análisis pseudoestático en la presente investigación, y para el cierre final usaremos un coeficiente sísmico de $1/2$ de la aceleración máxima que corresponde a $C = 0.165$.

2.2.12. Cobertura vegetal y revegetación

Un ecosistema degradado necesita de estrategias de restauración (proceso lento y dificultoso), para poder restaurar la condición inicial del área. Las técnicas de restauración que se puedan aplicar son la revegetación con el cual incrementa la cobertura vegetal o barrera contra la erosión, ya que el suelo no posee de un elemento aislante para protegerse de las variaciones de la temperatura que pueden afectar la germinación y establecimiento de las plantas. (Garcia, 2016)

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmosfera y el suelo. Sus componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, disminuyendo el efecto erosivo al no actuar directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a aumentar la resistencia mecánica del suelo. (López, 2002)

La cobertura vegetal es aquella que consideran el desarrollo de las plantas o cultivos, con la finalidad de mejorar la capacidad productiva de los terrenos y ayudar a disminuir la erosión de los suelos (Figuroa y Morales, 1992).

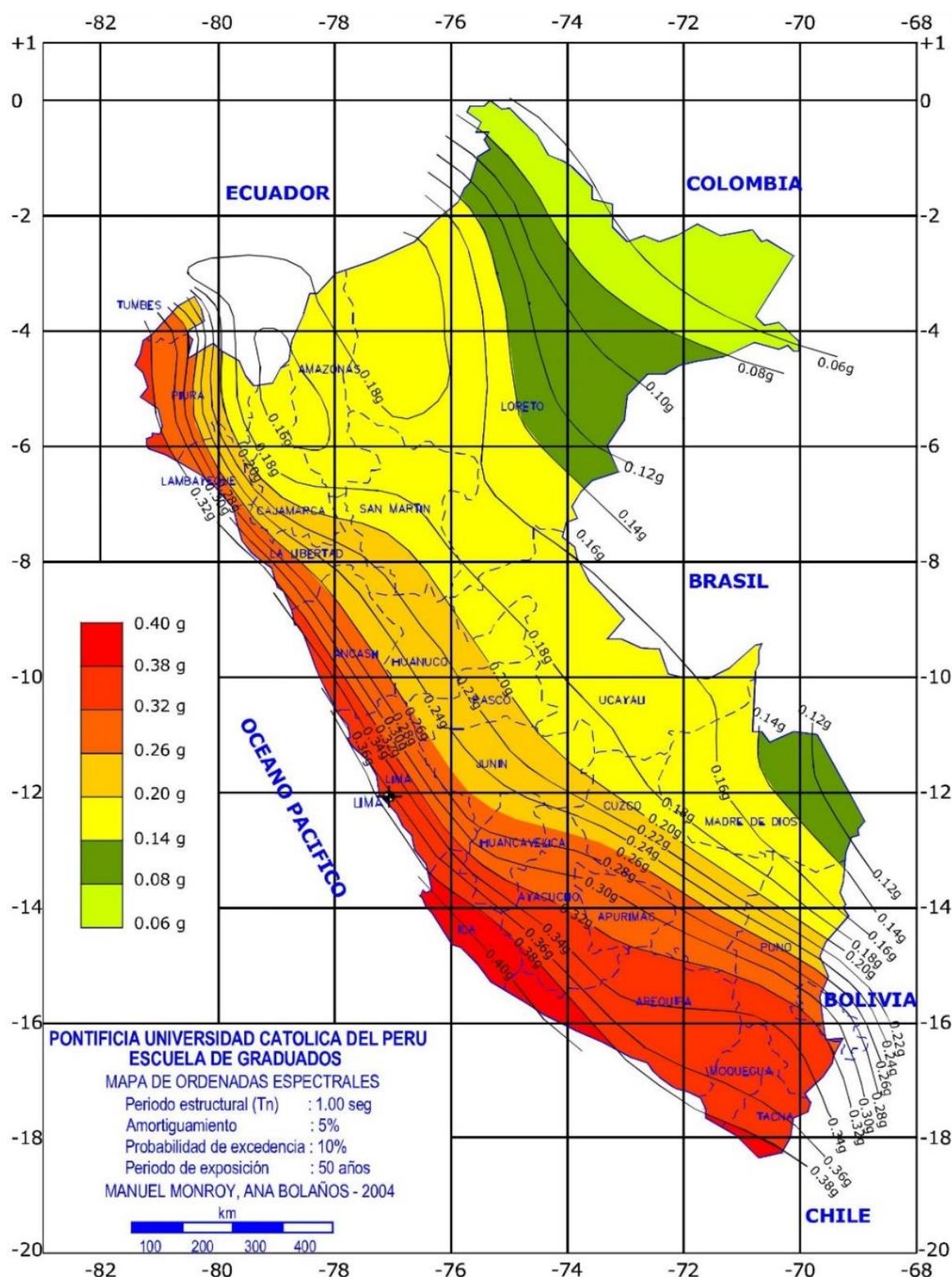


Figura 15. Distribución de ordenadas espectrales para el Perú correspondientes a un periodo estructural de 1.0 seg. con 5% de amortiguamiento y periodo de retorno de 475 años. Bolaños & Monroy, 2004

Las técnicas más eficientes para la revegetación y la estabilidad de los taludes son la regeneración natural, la siembra de especies exóticas y nativas, el trasplante de plántulas, la aplicación de fertilizantes con escarificación del suelo, el uso de mantas sintéticas, biomanta y la polimerización de polímeros en gel (Gray & Sotir, 1996)

2.2.12.1.Suelo fértil

Constituye una cubierta delgada de la superficie terrestre, los suelos permiten el enraizamiento de las plantas (anclaje).(Porta, 2011)

El material inicial del suelo es la roca madre o material parental, formado a raíz del enfriamiento de la corteza terrestre. Su desintegración se realiza por la acción de varias fuerzas: fuerzas físicas (cambios de temperatura, por acción del agua, etc), por fuerzas químicas (hidrolisis, oxidación, etc) y biológicas (acción de micro y macroorganismos) que ofrece al medio.

El material originario, también denominado roca madre constituye la masa mineral de la que se parte en la formación de un suelo. La meteorización consiste en la transformación parcial o total de las rocas y los minerales, al entrar en contacto con la atmosfera, por aflorar en la superficie. En la cual intervienen procesos de disgregación física (rotura mecánica) y de la alteración biogeoquímica. Resultan de la contribución de los factores: clima, relieve y seres vivientes.(Salamanca, 2006)

El suelo empieza a formarse tan pronto como se establecen organismos que aporten materia orgánica al sistema, la meteorización puede proporcionar una parte significativa de los requerimientos nutricionales de la biota del suelo, a partir de las partículas más finas, si bien lo hace de una manera extremadamente lenta. (Porta, 2011)

Propiedades químicas del suelo

pH

El intervalo del pH va de 0-14, el intervalo de 5.8 a 7.5, se considera el más deseable o menos problemático para la mayoría de los cultivos. Por debajo de 5.5 es muy probable que existan problemas de toxicidad por aluminio y manganeso, mientras que por arriba de 7.5 generalmente reduce la disponibilidad de fósforo y todos los micronutrientes a excepción del molibdeno. En suelos con pH es probable la presencia de CaCO_3 , un pH superior a 8.5 indica la presencia de NaCO_3 , que ameriten el tratamiento del suelo con yeso, azufre y otros materiales ácidos para corregir el problema. (Rodríguez & Rodríguez, 2015)

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica es una medida indirecta de la cantidad de sales que contiene un suelo. Los suelos con elevadas conductividades eléctricas impiden el buen desarrollo de las plantas, ya que contienen asimismo una elevada cantidad de sales. (Garrido, 1994) Ver Tabla 8.

Tabla 8.
Conductividad eléctrica

Nivel en mili Siemens/ cm	Interpretación
0 – 2	No hay Problemas de salinidad
2 – 4	Ligeramente salino
4 - 8	Moderadamente salino
8 – 16	Fuertemente salino
> 16	Extremadamente salino

Fuente: Salamanca, 2006

Materia orgánica nutrientes del suelo.

Indica la disponibilidad nitrógeno aprovechable, además de ser un factor determinante en la formación de la estructura del suelo, la cual influye en la facilidad de

penetración radicular, resistencia a la compactación, infiltración y retención de agua.

(Rodríguez & Rodríguez, 2015). Ver Tabla 9.

Tabla 9.
Materia orgánica.

Materia orgánica (%)	Clasificación agronómica
<0.60	Muy bajo
0.60-1.80	Bajo
1.81-3.50	Mediano
3.51-6.0	Alto
>6.0	Muy alto

Fuente: Rodríguez, 2015

Capacidad de intercambio atómico (C.I.C.)

Rodríguez & Rodríguez (2015) define como la suma de cationes intercambiables de un suelo, se expresa en [mEq] 100 g⁻¹ de suelo seco. Ver Tabla 10.

- La capacidad de intercambio, depende fundamentalmente de la naturaleza del mineral arcilloso que forma parte del suelo, y del tamaño de las partículas.
- Los cationes de intercambio específico, cuya adsorción está en función de la valencia del ion, radios iónicos hidratados, concentración de la solución y porcentaje de posiciones iónicas ocupadas.

Tabla 10.
Capacidad de intercambio atómico.

Nutriente ([mEq]/100ml)	Deficiente	Nivel Crítico	Nivel Óptimo		
Ca	0.3	2.2	4.0		36
Mg	0.12	0.8	2.0		18
K	0.03	0.2	0.4	0.6	3

Fuente: Rodriguez, 2015

Salamanca (2006) menciona “la importancia de que a mayor capacidad de intercambio catiónico, mayor fertilidad del suelo”.

Los nutrientes primarios como el fósforo, nitrógeno y potasio del suelo es indispensable, ya que estos son considerados como los macronutrientes esenciales para toda planta. Con los resultados se establece la cantidad de fertilizante que se debería adicionar para lograr en las especies vegetales un estado nutricional saludable. (Rodríguez & Rodríguez, 2015)

Saturación por bases

Expresa la relación porcentual entre la suma de los cationes intercambiables basificantes (Ca, Mg, K, Na) y la C.I.C. Relacionado con el pH, Son buenos indicadores del estado del complejo de cambio, la fertilidad mineral, la actividad biológica y el grado de desarrollo del suelo.(Porta, 2011)

2.2.12.2.Preparación del terreno

Antes de proceder con la implantación de la vegetación es necesario realizar una serie de operaciones de preparación encaminadas a corregir estas deficiencias, para crear en la zona de actuación como condiciones topográficas, de drenaje y la calidad de sustrato adecuadas, pueden agruparse en tres medidas:(López, 2002)

- Remodelado y control de drenaje.
- Preparación mecánica del sustrato.
- Mejoras edáficas.

La cabecera, pie y bordes laterales de los taludes suelen presentar perfiles escarpados, que resultan difíciles de revegetar y están más expuestos que el resto de la estructura a la erosión por escorrentía superficial, al desecamiento y a la acción erosiva del viento.

Preparación mecánica del terreno

Es necesario realizar una serie de labores, que genéricamente podría incluirse en lo que se denomina preparación de la cama de siembra y que están estrechamente relacionados con lo que es propiamente la implantación de la vegetación. Su objetivo es crear condiciones adecuadas para que las labores de implantación puedan realizarse correctamente, y asegurar además niveles óptimos de germinación y arraigo de la vegetación. El método de preparación que debe aplicarse está determinado por la forma de implantación de la vegetación que vaya a ser empleada, la accesibilidad y pendiente del talud, el tipo de suelo y su contenido en humedad. (López, 2002)

Modificación de suelos y mejoras edáficas

Por regla general, las superficies de los taludes no presentan unas características físicas, químicas ni biológicas adecuadas para el desarrollo de la vegetación. Ausencia de materia orgánica, la pobreza de elementos nutritivos, las estructuras poco inestables y las texturas extremas. (López, 2002)

Las técnicas y productos aplicables para mejorar las características del sustrato son diversas. Estas pueden englobarse en cuatro tipos básicos:

- Aporte y extendido del suelo, para crear sobre la superficie del talud un perfil con las características fisicoquímicas y espesor suficiente para el arraigo y desarrollo de la vegetación que vaya a implantarse. Este suelo puede estar constituido por tierras naturales, de préstamo u obtenidas mediante la retirada previa del suelo en la zona de actuación.
- Enmiendas orgánicas: el material más utilizado en las enmiendas es el estiércol, el compost.
- Fertilización con productos orgánicos.

- Adición de productos acondicionadores.

2.2.12.3.Revegetación

La vegetación en los proyectos de ingeniería se utiliza, generalmente, para reducir el impacto visual ocasionado por las obras y para realizar la calidad paisajística de las zonas donde se ha actuado. la existencia de una cubierta vegetal incrementa la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y su tasa de infiltración. También aumenta la resistencia y la estabilidad del suelo en que se desarrolla. (López, 2002)

La revegetación de los taludes artificiales, tanto en las excavaciones como los rellenos, se convierte en una solución técnica de primer orden para la restauración paisajístico-ambiental, ya que permite.

- Integrar la obra en su entorno ecológico-paisajístico.
- Proteger con la cubierta vegetal las zonas con riesgo de erosión.

Se puede apreciar en la Figura 16, la influencia que tiene el ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión sobre la vegetación en la restauración de escombreras mineras.

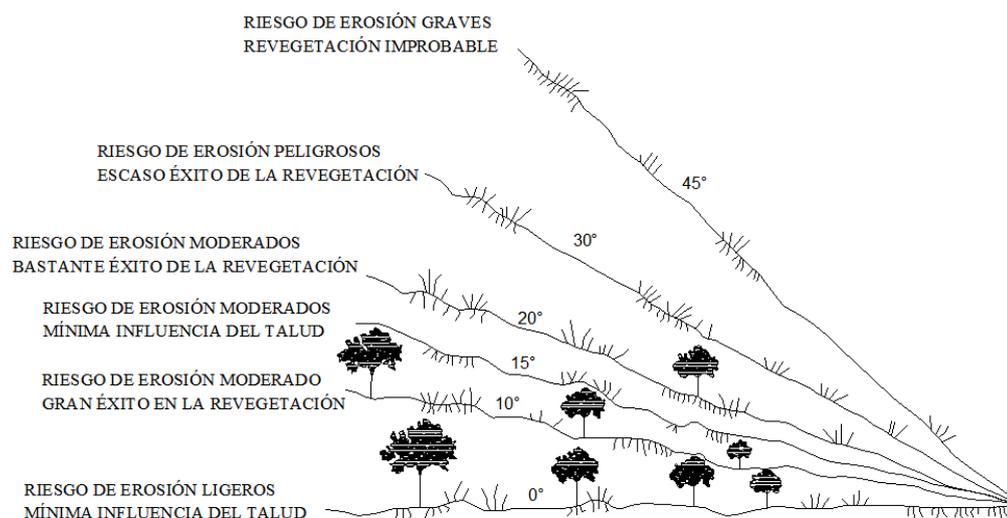


Figura 16. Influencia del ángulo de inclinación de un talud sobre la erosión y la revegetación.

Fuente: Departament of the enviroment, 19998

La elección del tiempo de siembra apropiado, el tipo de suelo y especialmente la pendiente son importantes para la germinación de semillas y el desarrollo de la planta, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11.

Influencia de la pendiente de talud en el establecimiento de la cubierta vegetal.		
Inclinación	Hierba	Arbusto / árbol
De 0° a 30°	Baja dificultad: se recomiendan las técnicas habituales de plantación.	Baja dificultad: se recomiendan las técnicas habituales de plantación.
De 30° a 45°	Dificultad media: se recomienda la siembra hidráulica	Alta dificultad
Más de 45°	Alta dificultad	Se recomienda plantar en los bermas

Fuente: Ley, et al, 2013

Efectos hidrológicos de la vegetación

La cubierta vegetal intercepta y retiene una proporción variable del volumen de agua de precipitación revivida. Parte de la precipitación interceptada se almacena en las hojas y tallos, desde donde regresa a la atmosfera por evaporación. El resto de la interceptación, denominada precipitación temporalmente interceptada, PTI, pasa al suelo escurriendo a lo largo de tallos, ramas y troncos, o goteando desde la superficie de las hojas.(López, 2002)

La cantidad de agua que se llega a escurrir depende del ángulo que forman los tallos, ramas y troncos con la superficie del suelo (*De Pley, 1982; Van Elewijck, 1989*). En las plantas cuyos tallos tienen un diámetro medio inferior al diámetro medio de las gotas de lluvia, como sucede en muchas plantas herbáceas, el volumen de agua de escurrimiento alcanza su valor máximo con ángulos entre 50° y 60°. Esta dependencia esta menos clara en plantas con tallos de diámetro mayor, aunque parece que los máximos de escurrimiento se alcanzan con ángulos inferiores a 60°.(López, 2002)

Evapotranspiración: Conjunto de pérdidas de agua en forma de vapor debido a la evaporación de la lluvia interceptada por la vegetación y a la transpiración de las plantas.

Infiltración: La permeabilidad del suelo y su infiltración es mayor en suelos provistos de vegetación que en suelos desnudos. Las acciones de la cubierta vegetal que determinan la aparición de este efecto son las siguientes:

- La interceptación retrasa la llegada del agua al suelo y disminuye la intensidad de la precipitación, evitando que el suelo quede saturado en poco tiempo.
- La transpiración de las plantas regula la dosis de humedad del suelo, manteniendo una capacidad del almacenamiento disponible, aun en épocas de gran humedad, y que permite que este recupere su capacidad de infiltración más rápidamente.

Modificación de las propiedades mecánicas

Reforzamiento del suelo por las raíces: las raíces de las plantas forman un armazón de fibras íntimamente entrelazadas, ligado a la matriz del suelo que refuerza su estructura e incrementa su resistencia al deslizamiento. Su acción es similar a la de los sistemas artificiales de reforzamiento y sostenimiento, en los que se mejora la resistencia y las condiciones de estabilidad del suelo mediante la inclusión en el de mallas tridimensionales. Las raíces proporcionan al suelo una mayor resistencia al corte por el mayor grado de cohesión interna que tiene la estructura compuesta raíces/suelo y la adhesión de las partículas de suelo a las raíces.

La premisa básica de este modelo perpendicular de raíces perpendiculares, de que estas cruzan el plano de rotura en ángulo recto, no siempre es cierta. Por ejemplo, las raíces de herbáceas que se introducen a más de 150- 200 mm de profundidad en el suelo

tienden a ser verticales; mientras que el plano de deslizamiento se inclina bastante en la mayor de las pendientes, resultando ángulos de intercepción raíz/plano de deslizamiento superiores a 90° .

Relieve topográfico

En la superficie plana las gotas de lluvia salpican las partículas de suelo aleatoriamente en todas direcciones, en un terreno en pendiente las partículas que se desplazan cuesta arriba, debido a su trayectoria parabólica, recorren menos distancia que si van cuesta abajo, por lo que, estadísticamente, cuando llueve sobre terreno inclinado y pelado, las partículas del suelo, por efecto de la salpicadura, tienden a desplazarse cuesta abajo, aumentando la proporción en función de la pendiente. (López, 2002)

2.2.12.4. Técnicas de bioingeniería en el tratamiento de los taludes

Construcciones vivas: técnicas de bioingeniería en el suelo

La bioingeniería del suelo es un caso particular de estabilización biotécnica en el que plantas completas o parte de estas, principalmente estaquillas de sauce, se introducen en el suelo con una distribución específica, de forma que proporcionan una serie de efectos que incrementan la estabilidad de los taludes. Los sistemas de bioingeniería del suelo son vulnerables recién instalados, pero ganan resistencia y eficacia una vez se desarrollan las raíces y la parte aérea de las plantas.

Cabe indicar que cada día se está haciendo un uso mayor de materiales vivos en la estabilización de los taludes, de manera que se han desarrollado todo un conjunto de técnicas constructivas y correctoras, que se integran en la disciplina que actualmente se denomina bioingeniería, ver Tabla 12, y que son en muchos casos una alternativa a actuaciones correctoras más agresivas para el medio ambiente. (López, 2002)

Tabla 12.

Clasificación de las técnicas de bioingeniería y estabilización biotécnica.

	Categoría	Ejemplos
Construcciones vivas	Técnicas convencionales de revegetación	- Siembra - Tepes - Trasplantes
	Plantas leñosas utilizadas como refuerzo y como barreras para la contención del suelo.	- Estaquillado - Faginas - Escalones de matorral - Paquetes de matorral - Esteras de matorral

Fuente: Gray & Sotir, 1996**2.2.12.5. Selección de especies vegetales y técnicas de implantación**

El éxito de la revegetación va a depender de que se conozcan todos los factores que influyen y condicionan en el establecimiento y desarrollo de la vegetación, y se apliquen las técnicas más adecuadas para corregirlos. (López, 2002)

Selección de especies vegetales:

Tiene como finalidad encontrar las plantas que mejor puedan cumplir los objetivos de estabilización asignados a la revegetación y que mejor se adapten a las condiciones ambientales de la zona de actuación. (López, 2002)

Criterios biotécnicos: funciones y propiedades como elemento de estabilización

La función que las plantas se deben cumplir como elemento estructural de estabilización o protección condiciona el tipo de vegetación que puede ser utilizada. Se aprecia en la Tabla 12. Por ejemplo, si se trata de controlar la erosión superficial, las funciones principales de la revegetación son el recubrimiento y la protección y, de acuerdo a esto, son preferibles las plantas con raíces fibrosas, superficiales y muy

extendidas capaces de crear una cubierta densa y continua, Por el contrario, si el objetivo principal es prevenir movimientos en masa en un talud , las funciones asignadas a la vegetación son el reforzamiento y el anclaje, y para ello se necesitan plantas con un sistema radicular fuerte y profundo que se desarrolle rápidamente y que, además, tengan tallos resistentes y una alta relación entre biomasa del sistema radical y la biomasa de la parte aérea. (López, 2002) Ver Tabla 13.

Tabla 13.
Función de la revegetación

Función	Características deseables
Contención y captura	<ul style="list-style-type: none"> - Ramificación desde la base - Tallos fuertes y flexibles - Rápido crecimiento de la parte aérea - Propagación rápida por esquejes y brotes de raíz
Revestimiento y recubierta	<ul style="list-style-type: none"> - Superficie de crecimiento extensiva y densa - Sistema radicular extendido, fibroso y superficial
Refuerzo y soporte	<ul style="list-style-type: none"> - Raíces profundas, fuertes y extendidas - Rápido crecimiento de sistema radical - Alta relación entre biomasa de la raíz y la de la parte aérea - Alta tasa de transpiración a través de las hojas

Fuente: López, 2002

La morfología de las plantas y su ciclo vital son los factores principales que determinan su adecuación para las distintas funciones. Figura 17 y 18.

Tanto las especies herbáceas como las leñosas pueden utilizarse para estabilizar taludes. Generalmente la vegetación herbácea es superior para prevenir y el control de la erosión superficial, mientras que las especies leñosas, árboles y arbustos, lo son para prevenir los procesos de inestabilidad superficiales y movimientos en masa. (López, 2002)

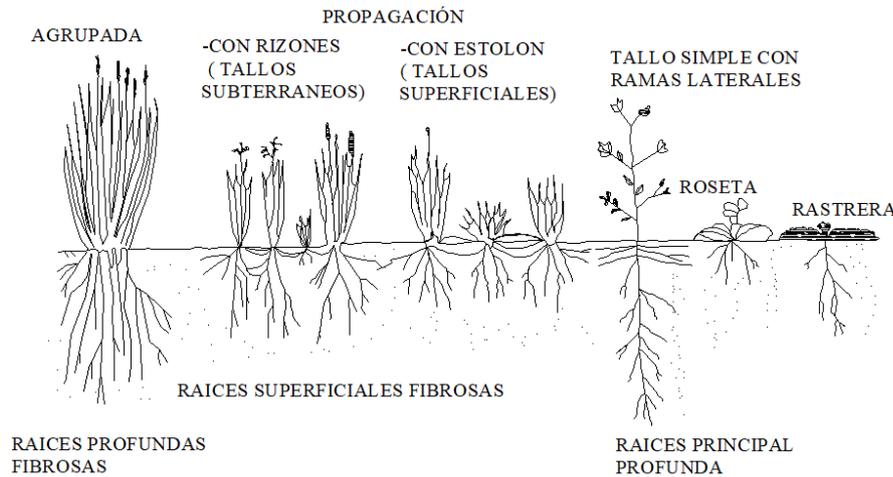


Figura 17. Formas de crecimiento de las plantas: herbáceas y matas.
Fuente. Coppin & Richards, 1990

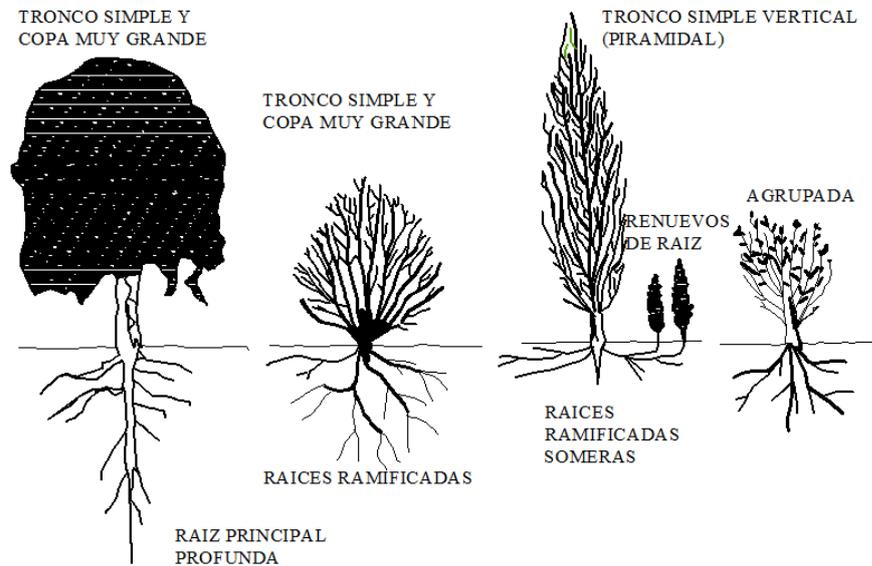


Figura 18. Formas de crecimiento de las plantas: árboles y arbustos.
Fuente. Coppin & Richards, 1990

Criterios ambientales: condiciones de la zona de actuación

El grado de adaptación y tolerancia a los distintos factores ambientales difiere mucho se unas especies a otras. Las especies elegidas deben de estar adaptadas y ser capaces de prosperar bajo las condiciones ambientales existentes en la zona de actuación. Los principales factores ambientales que deben ser considerados para determinar cuáles son las especies más adecuadas son las siguientes:(López, 2002)

Criterios ambientales: condiciones de la zona de actuación

El grado de adaptación y tolerancia a los distintos factores ambientales difiere mucho de unas especies a otras. Las especies elegidas deben de estar adaptadas y ser capaces de prosperar bajo las condiciones ambientales existentes en la zona de actuación. Los principales factores ambientales que deben ser considerados para determinar cuáles son las especies más adecuadas son las siguientes:(López, 2002)

- Bioclima: es la combinación de factores climáticos que determinan el crecimiento de la vegetación y la supervivencia de distintas especies, este factor no puede ser modificado. Para la selección de especies, su análisis y definición debe de realizarse en dos niveles de detalle.
 - Nivel regional, en la que influye la altitud, latitud y el alejamiento del mar.
 - Nivel local o microclima, condiciones locales, de carácter eminentemente topográfico, que modifican las características climáticas generales.

- Características del sustrato: el suelo es un sistema biofísico que actúa de forma compleja con y sobre la vegetación. Es la fuente y dispensa de elementos nutritivos y agua para las plantas, y en él está contenido el oxígeno necesario para la respiración de las raíces. Las características del sustrato si pueden ser modificados mediante la utilización de técnicas específicas de tratamiento y preparación del suelo, y adecuarlas a las necesidades de la vegetación.(López, 2002)
 - Textura y densidad
 - Fertilidad
 - Reacción del suelo o pH

- Consideraciones fitosociológicas: la evolución de la composición específica y de la estructura de la vegetación implantada no siempre pueden ser predichas a largo plazo, es conveniente utilizar una mezcla de plantas que incluya especies pioneras, capaces de establecerse rápidamente, para crear a corto plazo una cubierta protectora frente a la erosión, junto con otras de crecimiento lento, capaces de permanecer una vez que las pioneras hayan desaparecido.

En la mayoría de las zonas el suelo desnudo, al principio, se desarrollarán comunidades de carácter ruderal, y la dirección en la que progresará posteriormente la vegetación implantada dependerá de las condiciones existentes de estrés relativo por clima y suelo. Si las condiciones ambientales son muy desfavorables, debido a la pobreza del suelo o a la dureza del clima, la vegetación progresara hacia el desarrollo de comunidades tolerantes al estrés.

2.2.12.6. Abonos orgánicos

Se conocen a los residuos de las cosechas, al estiércol, a los abonos verdes y a los residuos industriales. (Salamanca, 2006)

2.3. Marco Conceptual

“Cierre progresivo: Actividades de rehabilitación que el titular de actividad minera va efectuando simultáneamente al desarrollo de su actividad productiva, de acuerdo al cronograma y condiciones establecidos en el Plan de Cierre de Minas aprobado y ejecutado bajo supervisión de la autoridad minera”. (MINEM, 2005)

“Cierre final: Conclusión definitiva de las actividades para el cierre de todas las labores, áreas e instalaciones de una unidad minera, que por razones operativas, no hayan

podido cerrarse durante la etapa productiva o comercial, de modo tal que se garantice el cumplimiento de los objetivos de cierre contemplados en el Plan de Cierre de Minas aprobado y cuya adecuada ejecución ha sido verificada a través de una auditoría integral dispuesta por la autoridad competente, sin perjuicio de las actividades de post cierre que deberán continuar ejecutándose en el marco de la legislación ambiental vigente”.(MINEM, 2005)

“Post cierre: Actividades de tratamiento de efluentes y emisiones, monitoreo y mantenimiento que deben realizarse luego de concluidas las acciones de rehabilitación hasta que se demuestre la estabilidad física y química del residuo o componente minero susceptible de generar impactos negativos, de acuerdo con el Plan de Cierre de Minas aprobado por la autoridad competente. La ejecución de obras de ingeniería y de construcción de infraestructura para la rehabilitación ambiental no están comprendidas en la etapa de post cierre”.(MINEM, 2005)

“Estabilidad física: Comportamiento estable en el corto, mediano y largo plazo de los componentes o residuos mineros frente a factores exógenos y endógenos, que evita el desplazamiento de materiales, con el propósito de no generar riesgos de accidentes o contingencias para el ambiente y para la integridad física de personas y poblaciones y de las actividades que éstas desarrollan”.(MINEM, 2005)

“Rehabilitación: Es el proceso conducente a que las áreas que hubieran sido utilizadas o perturbadas por los diferentes componentes de las actividades mineras, alcancen estabilidad química y física, así como la recuperación de las comunidades de flora y fauna locales; características que representen riesgos mínimos a la salud humana; en la medida de lo posible, condiciones que permitan algún uso posterior del suelo, sea

de orden pasivo (bosques, esparcimiento, etc.) o productivo (pastoreo, forestal, etc.), entre otros aspectos específicos relacionados con las características particulares de dichas áreas".(MINEM, 2005)

Caída de rocas: El término "caída de rocas" se usa típicamente para material suelto que cae o rueda desde las caras. Como tal, es principalmente un problema de seguridad, aunque posiblemente podría ser un precursor de la inestabilidad a gran escala. La caída de rocas puede ser un síntoma de una implementación deficiente del diseño, es decir, malas prácticas de voladura y / o escalado. Sin embargo, también puede resultar de la degradación de la pendiente como resultado de la intemperie o de la acción de congelación-descongelación.(Read & Stecy, 2009)

Mapeo Lineal: Implica medir y registrar los atributos de todas las estructuras que intersecan una línea de muestreo dada. La técnica se ha utilizado en minería e ingeniería civil durante muchos años y ha sido bien documentada por varios autores (Priest & Hudson 1981; Windsor & Thompson 1997; Harries 2001; Brown 2003).(Read & Stecy, 2009)

Dip: Es la inclinación máxima de un plano de discontinuidad estructural a la horizontal, definido por el ángulo.(Administrations, 1989)

La dirección de inmersión o el azimut de inmersión: Es la dirección de la traza horizontal de la línea de inmersión, medida en sentido horario desde el norte, como lo indica el ángulo α .(Administrations, 1989)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de investigación

La metodología de investigación utilizada para el presente trabajo de investigación es de tipo descriptivo, no experimental transeccional orientado a la estabilidad de taludes, la identificación de cobertura y la selección de especies de vegetación para el cierre de minas del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro. Donde se detallan las características de la geotecnia del macizo rocoso y de las especies de vegetales existentes.

3.1.2. Diseño de investigación

El diseño es descriptivo, donde se describen relaciones entre las variables estabilidad y revegetación de talud.

La investigación descriptiva, comprende la descripción, análisis e interpretación de la naturaleza actual de los datos. Utilizando el método de análisis, se logra caracterizar un objeto de estudio o una situación concreta, señalar sus características y propiedades.

3.2. Población y muestra

Al ejecutar el presente trabajo de investigación para la población y muestra es necesario considerar el universo de la investigación y una parte representativa de ese universo que constituye la muestra.

3.2.1. Población

La población del presente estudio está conformada por el proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro, de las que este trabajo tomará como referencia.

3.2.2. Muestra

La muestra es la parte de la población, para nuestro estudio se tomará el Tajo 1 con un área de 0.854 hectáreas y un perímetro de 504.84 metros del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro. Ver Tabla 15.

3.3. Definición de variables

3.3.1. Variable independiente

- Condiciones del macizo rocoso del tajo 1 del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

3.3.2. Variable dependiente

- Ángulos de talud para su estabilización del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.
- Cobertura y especie adecuadas del talud para el cierre de minas del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

3.3.3. Operacionalización de variables

Tabla 14.
Operacionalización de variables de presente investigación.

Variable	Indicadores	Índice
Variable independiente:		Roca muy buena
Condiciones del macizo rocoso	RMR	Roca buena
		Roca regular
		Roca mala
		F.S.
Variable dependiente 1:	Tipos de rotura	
Estabilidad del talud	Ángulos de talud	
	Caracterización de roca desintegrada	Propiedades de roca desintegrada y meteorizada.
Variable dependiente 2:		
Cobertura y vegetación del talud	Identificación de especies vegetales	

Especies de vegetación
existentes

3.4. Técnicas

Técnica de Investigación.

La técnica o metodología utilizada. Es una investigación no experimental. Es de tipo descriptivo, porque describe el macizo rocoso en función del factor geomecánico RMR y luego GSI, también se realiza la identificación de especies vegetales existentes en la zona de estudio.

Trabajos en campo: En la técnica usada en la presente investigación se tendrá en cuenta los datos de campo y las observaciones de los taludes. Los instrumentos usados en esta etapa serán los datos de campo (in-situ), obtenidos durante los trabajos levantamiento topográfico, mapeo geotécnico y recolección de datos de especies vegetales.

Trabajos de laboratorio: Se realizó ensayos de laboratorio, para determinar los diferentes parámetros o propiedades físicas y mecánicas de la roca, las propiedades de la roca intacta, propiedades de resistencia y caracterización de la roca en proceso de desintegración. Los medios utilizados fueron los testigos (muestras) recolectados durante los trabajos de campo. Asimismo, se realizó la caracterización de suelo.

Trabajos en gabinete: Se consideró tesis bibliográficas, artículos y libros, mapa geológico, análisis computacional con la utilización de software: AutoCAD, ArcGIS, (RocData, Dips, RocPlane, Swedge), cálculos detallados de estabilidad, se utilizó en esta etapa, la información recopilada durante las etapas anteriores.

En el aspecto técnico la primera parte de esta investigación comprendió en realizar el levantamiento topográfico del área del estudio, que son los taludes del tajo 1.

En la segunda parte de esta investigación comprendió del estudio geotécnico, este estudio nos permitirá determinar las características geotécnicas del macizo rocoso. El procedimiento a seguir en esta segunda parte fue el de hacer un reconocimiento y levantamiento de la información de campo.

En la tercera parte se determinó en forma cualitativa y cuantitativa los diferentes parámetros físicos y mecánicos del macizo rocoso. El procedimiento fue, la toma de muestras (testigos) y posteriormente se realizará las pruebas de laboratorio.

En la cuarta, se realizó una evaluación de la estabilidad del talud final del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro, aplicando el análisis de estabilidad de taludes por el método estereográfico o cinemático y equilibrio límite. Con lo cual, se determinó el ángulo del talud final para un cierre de minas, para garantizar la estabilidad a largo plazo.

En la quinta parte ya contando con el ángulo final de talud se procederá a definir la cobertura y proponer la revegetación a utilizar, identificando las propiedades del suelo y la especie a ser utilizada para el cierre de minas del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro, teniendo como referencia los vegetales ya existentes en la zona de estudio.

3.5. Instrumentos

Los instrumentos que se han utilizado en el presente estudio son:

Para realizar el levantamiento planimétrico detallado del área de investigación se utilizó:

Equipo Topográfico de Relleno

- 01 cuaderno topográfico
- 01 estación total marca Leica, modelo TS06 PLUS: Con la medición de distancia electrónica PinPoint (EDM), TS06 plus ofrece un equilibrio perfecto en:
 - Alcance
 - Precisión
 - Fiabilidad
 - Visibilidad del haz
 - Tamaño del punto láser
 - Tiempo de medición

Con una amplia variedad de opciones EDM, TS06plus ofrece unas mediciones extremadamente precisas.

- 02 GPS Marca GARMIN eTrex
- 01 bastón porta prismas
- 01 prisma
- 02 radios transmisores marca Motorola.

Equipo de cómputo

- 01 computadora laptop Lenovo i7.

Equipo de Software Topográfico

- Auto CAD civil 3D 2016
- Auto CAD 2016

Para cumplir con la caracterización geotécnica del macizo rocoso se utilizó los instrumentos de medición.

- 01 brújula marca Brunton: Es un equipo diseñado para obtener orientaciones gracias al campo magnético terrestre, posee una aguja imantada que se dispone en la misma dirección que las líneas de magnetismo natural del planeta.
- 01 Cinta Métrica de 50 metros: su uso fue empleado para la medición de espaciamiento entre discontinuidades
- 01 flexómetro: es un instrumento de medición, estos hechos de acero, son centimétricas e incluso algunas milimetradas, con las marcas y los números pintados o grabados sobre la superficie de la cinta
- 01 Píca: Acero sólido forjado, de una sola pieza que tiene la función de partir rocas y de acuerdo a una tabla poder estimar su resistencia de la roca golpeada.
- Tableros acrílicos A4: Son tableros de madera de tamaño A-4 y servirá como apoyo para los formatos de registro.
- Fichas geotécnicas: Son hojas en A-4 diseñados en función a los datos que requerimos recolectar a fin poder caracterizar el macizo rocoso y su diseño se basa en el sistema de clasificación RMR y GSI.
- Martillo Schmidt: Ideado en un principio para estimar la resistencia a compresión simple del concreto, el martillo Schmidt se ha modificado convenientemente dando lugar a varios modelos, alguno de los cuales resulta apropiado para estimar la resistencia a compresión simple de la roca (RCS). El ensayo consiste en medir la resistencia al rebote de la superficie de la roca ensayada en mojada y seca. La medida de rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante un gráfico debido a Miller (1965)

que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto al plano ensayado

Para realizar las simulaciones de los tajos y poder determinar las condiciones del macizo rocoso se usó el software Rocscience:

- Software Rocscience Dips v6.008: Dips está diseñado para el análisis interactivo de datos geológicos basados en la orientación. permite al usuario analizar y visualizar datos estructurales siguiendo las mismas técnicas que se utilizan en estereotipos manuales. Además, tiene muchas características computacionales, como el contorno estadístico de la agrupación de orientación, la orientación de la media y el cálculo de confianza, la variabilidad de la agrupación y el análisis cualitativo y cuantitativo de los atributos de la característica. Se han considerado las fallas que tenían mayor persistencia.
- Software Rocscience RocPlane v2.0: una herramienta de software interactiva y fácil de usar para evaluar la estabilidad de los planos bloques deslizantes en laderas rocosas. También permite a los usuarios estimar la capacidad de soporte requerido para lograr un factor de seguridad especificado.
- Software Rocscience Swedge v4.0: es una herramienta de análisis rápida, interactiva y fácil de usar para evaluar la geometría y la estabilidad de las cuñas superficiales en pendientes de rocas. Calcula el factor de seguridad para una cuña de orientación conocida.

Para realizar la revegetación de los taludes y poder proponer la especie a utilizar:

- Identificación de la capacidad de uso mayor de suelos y muestreo de suelo para su respectiva caracterización en laboratorio.

- Identificación de las especies (listado y colecta de especies) del tajo.

3.6. Generalidades

3.6.1. Ubicación

El proyecto Maricielo 2003 se ubica en el distrito de Tiquillaca, provincia de Puno, al extremo sudoeste del departamento de Puno, a 45 Km. por carretera a Juliaca, la altitud varía entre 3900 y 4100 metros sobre el nivel del mar.

Su posición en coordenadas UTM según la Carta Nacional 32-V, en la zona 19 de la Carta de Puno. Ver Anexo 01-1: Plano de Ubicación.

3.6.2. Accesibilidad

El acceso al área del proyecto, partiendo de la Ciudad de Lima se describe en el siguiente cuadro: Ver Tabla 16.

Tabla 15.
Área de investigación en coordenadas WGS84.

Vértice	Coordenadas WGS 84	
	Este	Norte
1	367740	8249640
2	367830	8249570
3	367880	8249560
4	367880	8249500
5	367770	8249500
6	367770	8249550
7	367720	8249620

Tabla 16.
Acceso al proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

Origen	Destino	Vía	Distancia(Km)
Lima	Juliaca	Asfaltada	1269.6
Juliaca	Cabanillas	Asfaltada	30
Cabanillas	Vilque	Afirmada	30
Vilque	Desvío	Asfaltada	6
Desvío	proyecto (Paraje Chila)	Trocha carrozable	5

3.6.3. Clima y meteorología

El proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro, se encuentra sobre altitudes comprendidas entre los 3900 y 4100 m.s.n.m; tiene un clima frígido y seco, según el DR. Javier Pulgar Vidal la clasificación de la zona corresponde a: Suni – Puna. Se distinguen dos estaciones bien marcadas durante el año:

- Una estación lluviosa correspondiente a los meses de verano, con fuertes precipitaciones pluviales, esto corresponde a los meses de enero a marzo, donde hay predominancia de un ambiente húmedo a templado con temperaturas de 10° a 15°C
- La segunda corresponde a los meses de invierno, se caracteriza por presentar un clima frígido y seco con ausencia de lluvias. La temperatura desciende notablemente hasta por debajo de 0°C.
 - A. - Seco – Frio: mayo – junio – agosto
 - B.- Seco – Cálido: septiembre – octubre
 - C.- Lluvioso – Cálido: noviembre – diciembre – enero – febrero
 - D.- Lluvioso – Frio: marzo – abril

Subtipos climáticos

En el estudio realizado por ONERN (1965), del sector prioridad I del departamento de Puno, se determinó que los pastos naturales desarrollan en un clima semiseco, generalmente sin presencia de precipitación pluvial y cambio térmico invernal bien definido. Este patrón climático presenta 4 subtipos térmicos de acuerdo con la distribución de la temperatura en el año:

Subtipo climático A: clima de la ribera del Lago, cuya temperatura promedio anual oscila entre 9,5°C y 5,5°C, siendo la precipitación pluvial promedio anual de 725

mm. La altitud de esta zona está comprendida aproximadamente entre los 3812 y 3870 msnm.

Subtipo climático B: clima de la zona de Orurillo-Asillo-Azangaro, con temperaturas promedio anualmente 13° C y 6° C con una precipitación pluvial promedio anual de 760 mm. Se da a altitudes entre 3870 a 3950 m.

Subtipo climático C: clima del altiplano, con temperaturas promedio anual que oscila entre 13° C y 3° C y una precipitación pluvial promedio anual de 672 mm. Su altitud está comprendida entre los 3950 y 4100 msnm.

Subtipo climático D: clima de las alturas, cuya temperatura promedio anual oscila entre 6° C y 0° C y una precipitación promedio anual de 500 a 900 mm y ocurre a más de 4100 msnm.

3.7. Geología

3.7.1. Geología regional

La secuencia estratigráfica de la región de Puno, presenta una diversidad de unidades litológicas, que albergan rocas sedimentarias, ígneas, volcánicas, y depósitos cuaternarios, en el área de estudio se emplazaron varios tipos de rocas, con diferentes composiciones y edades que van desde el cretáceo superior hasta el cuaternario reciente.

Cretáceo superior

Formación Ayabacas (Ks-ay)

Esta unidad litológicamente está compuesta por calizas caóticas envueltas en una matriz limosa roja. En la Formación Ayabacas no se ha encontrado fósiles para determinar una edad precisa, pero se le atribuye la edad de Cretáceo Inferior-Superior.

Formación Vilquechico (Ks-vil)

En la región de Puno se encuentra constituida por una interestratificación de limoarcillitas gris rojizas, cremas y rojas con estratificación fina, recubiertas por limoarcillitas y areniscas marrón rojizas de grano fino a medio, moderadamente cementados. Afloran en las localidades chila palline, en donde suprayace en concordancia a la Formación Ayabacas e infrayace en concordancia a la Formación Muñani.

Está compuesta principalmente por lutitas rojas y verde grisáceas a pardo amarillentas, en capas delgadas que se intercalan con areniscas cuarzosas grises de grano fino. Las características sedimentarias de esta formación indican un ambiente marino.

Formación Muñani (P-mu)

Esta unidad litológica fue descrita por primera vez por NEWELL, (1945-1949) en proximidades de la localidad de Muñani. Las características sedimentarias de esta formación como son areniscas gruesas, de grano medio y fino, color rosado a rojizo, conglomerados, lutitas rojas; sugieren un ambiente fluvio-continental; otras características, como grandes superficies de erosión en la base de conglomerados, canales entrelazados, secuencias estrato crecientes coronadas por canales en trenza, indican subambientes de canales alimentadores, llanura aluvial con canales, barras y lóbulos con canales distribuidores.

Intrusivos subvolcánicos

Son numerosas intrusiones de cuerpos subvolcánicos leucócratas preferentemente de cuarzo y feldespatos. Se emplazan en la parte central de la hoja de Puno asociados a rocas de naturaleza porfirítica, caracterizadas por su grano fino con composiciones que alcanzan los rangos de diorita a monzogranito y son altamente diferenciables.

Pórfido diorítico (N-po)

En el cuadrángulo de Puno se encuentran una serie de cuerpos intrusivos muy segmentados, asociados a fallamientos, a la formación Ayabacas. Los cuerpos de grano más fino que afloran en el río Cairane y Supaylaya, muestran intrusiones leucócratas con poco cuarzo dispersado y fenocristales de feldespato, con presencia de plagioclasas y textura microcristalina seriada. Se agrega a los afloramientos descritos en Liapunta, Torine, Tolacollo y el de Pataqueña Grande, en este último intrusivo se muestran niveles de brechas volcánicas angulosas a subangulosas alteradas por arcillas y con niveles de cuarzo secundario.

Dentro de los intrusivos que están circunscritos en la edad Cenozoica, se distinguen unos de composición diorita en el sector central de la región, se comportan de manera dispersa, esto entre los distritos de Paucarcolla, Vilque, Mañazo, Cabanilla y Cabanillas. Cortan rocas sedimentarias de edad Cretácica como es el caso de los cerros San Cristóbal de Coallaque, Sutuca, Cupe, Quearaya, entre otros; este último encaja la mineralización de la Mina Los Rosales (Distrito de Vilque).(Valencia & Solís, 2003)

Tabla 17.
Columna estratigráfica regional.

Edad		Unidades Litoestratigráficas	Litología	Descripción	
Eratema	Sistema Serie				
Mesozoica	Cretáceo	Superior	Fm. Muñani	 Ks-mñ	<p>Areniscas rojas con laminación oblicua y horizontal intercaladas con limolitas rojas.</p> <p>Limoarcillitas gris verdosas interestratificadas con limoarcillitas marrón rojizas.</p> <p>Calizas micríticas gris claras con venas de calcita y arcillitas rojas. Niveles de limoarcillitas rojas.</p>
			Fm. Vilquechico	 Ks-vil	
			Fm. Ayabacas	 Ks-ay	

Fuente: Ingemmet (cuadrángulo 32v franja 2-Puno)

3.7.2. Geología local

En el área de estudio se encontró una secuencia de unidades litológicas de origen sedimentario, marino. Los cuales se formaron por diferentes procesos geológicos, en ciertos periodos de tiempo por ello se presenta las variedades de rocas y suelos. También afloran rocas de origen subvolcánico, producto de las actividades volcánicas en la tectónica andina.

Porfido diorítico (N-po)

Esta unidad está asociada a fallamientos de la formación Ayabacas, es un intrusivo subvolcanico silicificado en una matriz de arcilla producto de la alteración, fenocristales de feldespato, con presencia de plagioclasa y textura microcristalina seriada con niveles blanquecinos, también se aprecian pequeños cristales de cuarzo en su estructura, tienen una matriz arcillosa, textura de grano medio a fino. Principales componentes de arcillas, feldespatos, anfíboles y cuarzo. Ver Figura 19.



Figura 19. Afloramiento del pórfido diorítico, alteradas con una coloración gris blanquecinas a pardas.

Limoarcillas gris violáceas (Lm-acll)

Esta unidad aflora al NW del tajo, constituye una línea de limoarcillas, débilmente compactadas debido a la compactación débil de sedimentos ocurrida en la zona, se aprecian niveles del intrusivo diorítico dentro de las limoarcillas puesto que estas litologías se encuentran en contacto. Ver Figura 20.

Limolitas rojizas (Lml)

Esta litología se ubica en contacto con las limoarcillitas gris violáceas, son formadas por la consolidación o sedimentación de limos, son rocas sedimentarias detríticas, es decir que las partículas que le dieron origen mantuvieron su integridad física durante su transporte, posteriormente se acumularon capas sedimentarias que con el tiempo se compactaron para dar lugar a la limolitas. Contienen óxidos de hierro y feldespatos. Ver Figura 21.

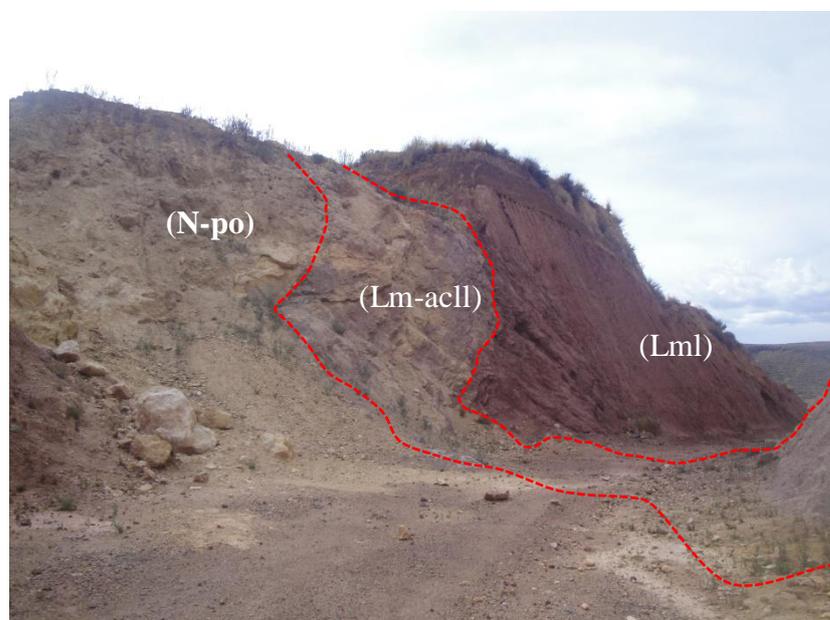


Figura 20. Contacto litológico, entrada al tajo.



Figura 21. Contacto de limolitas rojizas, limolitas gris violáceas y el intrusivo pórfido diorítico al NW del ingreso al tajo.

Depósito de desmonte (D-dsmt)

Los depósitos son producto del desbroce del mineral, mediante el cual hicieron la explotación de dicho yacimiento de hierro, este material se encuentra al NE del tajo, cuyo contenido varía desde depósitos cuaternarios y parte del intrusivo, lutitas y bloques de roca caliza. Ver Figura 22.

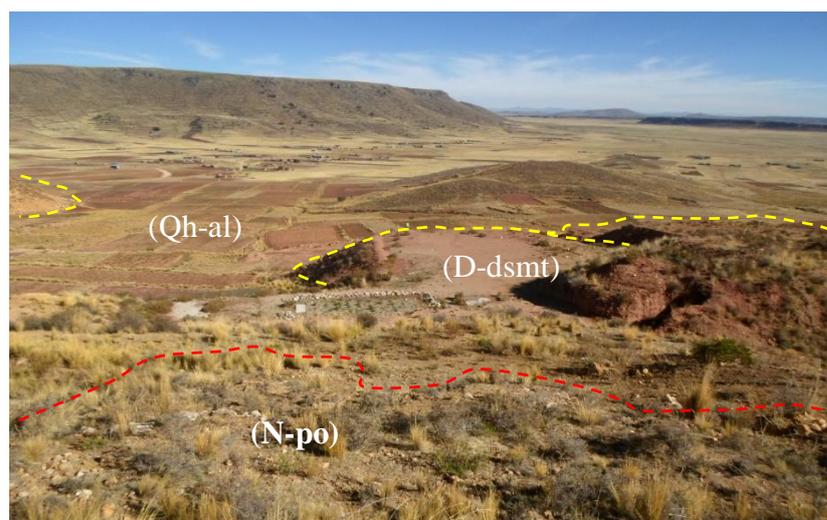


Figura 22. Afloramiento de los depósitos de desmonte, al NW del tajo.

Estructura mineralizada

La mineralización del área de estudio está constituida por óxidos de hierro, con contenidos de magnetita y hematita como minerales de mena, siendo el mineral de valor económico del yacimiento, de importancia económica. La estructura mineralizada tiene una dirección NW – SE, es un cuerpo amorfo con una potencia que varía desde 4 a 7 metros, que profundiza unos 20 metros aproximadamente. Ver Figura 23.

Secuencia paragenética del yacimiento

La secuencia paragenética sería el origen de los minerales de acuerdo de impulsión intrusiva dando una mineralización de valor económico, en la zona mayormente existe cuerpos de hierro, este yacimiento se produjo por el contacto entre el intrusivo y las calizas.

Mineralogía del yacimiento

La mineralogía del yacimiento es variada se pudo determinar la presencia de minerales de fierro, hematita, especularita, y óxidos de fierro, estos últimos producto de la alteración que sufrieron los principales minerales al entrar en contacto con las aguas meteóricas, produciéndose así una reacción química, que posteriormente modifico su estructura mineralógica. También este cambio ocurre cuando un intrusivo magmático entra en contacto con las rocas, y de esta manera produciéndose la formación de nuevos minerales y cambiando la composición de la roca inicial. Ver Figura 23.

Vetas

La estructura mineralizada (veta) están controladas por las fracturas de las fallas, es decir, los fluidos mineralizantes aprovecharon las fracturas de las fallas para rellenar con fluidos magmáticos y posteriormente llegar a mineralizar. En la zona se aprecia una veta con una mineralización, hematita, limonita y otros minerales.



Figura 23. Tajo del yacimiento minero.

Depósitos cuaternarios

Depósitos aluviales reciente (Qh-al)

Los depósitos aluviales recientes, están constituidos por materiales que han sido arrancados y transportado por el agua, y depósitos de alteración in situ de las rocas. En general estos depósitos se encuentran poco consolidados por materiales de composición heterogéneos, no cuentan con una selección de su estructura, en el área de proyecto se aprecian arenas limosas con clastos polimigticos angulosos a subredondados, estos depósitos se aprecian en las faldas de los cerros, en quebradas del chachacomani. Ver Figura 24.

3.7.3. Geomorfología

El tramo carretero atraviesa un paisaje típico de la zona alto andina, contemplándose cuatro unidades geomórficas bien definidas:



Figura 24. Depósitos aluviales recientes.

Unidad de cerros colinas y laderas

Esta unidad está constituida por una cadena de cerros con alturas que van desde los 3900 – 4100 m.s.n.m. Esta unidad se caracteriza por ofrecer perfiles bajos, suaves y empinados y alturas algo uniformes. Litológicamente esta acentuada en roca volcánica cubierta esta por material detrítico.

Unidad de valles y quebradas.

Esta unidad geomórfica está constituida por las quebradas angostas y valles que se inician en las partes altas de los cerros y progresivamente se ensanchan en la zona plana. Litológicamente esta unidad consta de materiales coluviales y morrénicos.

Unidad de pampas

Esta unidad geomórfica, está constituida por las pampas que forman áreas de suave relieve con superficies planas.

Unidad de pie de monte.

Esta unidad geomórfica está formada por todas las zonas del pie de los cerros, en el cual existe acumulación de material producto de la erosión de las zonas altas de los cerros.

3.7.4. Hidrología

El nivel freático en la zona de estudio es de 3895 m.s.n.m. lo que se reflejara en el plano topográfico del Anexo 01, Plano 01-1, en la zona no existe presencia de agua superficial que está en forma de río o lago.

3.8. Fauna asociada a unidades de cobertura vegetal

Las características abióticas (topografía, suelos, altitud sobre el nivel del mar, temperatura, vientos, precipitación, entre otras) presentes en la zona de estudio permiten el desarrollo de una vegetación característica que permite realizar una diferenciación de los ambientes que ocupan.

De acuerdo a la evaluación de campo realizada en el área de estudio se han identificado cuatro unidades de cobertura vegetal que se muestran en la Tabla 18 y la Tabla 19 de fauna presente en la zona del proyecto.

Tabla 18.
Unidades de cobertura vegetal

Símbolo	Unidades
Sv	Vegetación escasa/ nula
To	Tolar
Chi	Chilliguar
Ich	Ichu

Tabla 19.
Fauna presente en la zona del proyecto.

Familia	Especie	Nombre científico
Nombre vulgar		
Clase aves		
Cathartidae	Pájaro carpintero	Geronaetus fuscescens
Clase mammalia		
Chinchillidae	Vizcacha	Lagydium peruanum
Muridae	Ratón de campo	Auliscomys boliviensis
		Phyllothis amicus

A continuación, se destaca la fauna que está asociada con cada unidad de cobertura vegetal.

Sin vegetación / nula

Pese a que esta zona no cuenta con vegetación que sirva para la alimentación de la fauna silvestre, es muy utilizada por las especies de gran desplazamiento.

Tolar

Con fauna de similar característica que la mencionada para el pajonal, destacándose entre ellas Chirigüe oliváceo (*Sicalis olivascens*), Trile altoandino (*Sicalis uropygialis*), Plomito grande (*Prhygilus unicolor*).

Chilliguar

La fauna observada en este campo vital está dada por aves, donde destacan el Plomito pequeño (*Phrygilus plebejus*), Trile alto andino (*Sicalis uropygialis*), Tortola cordillerana (*Metriopelia melanoptera*) Es común la presencia de roedores nocturnos como *Phyllotis amicus* y *Auliscomis pictus*, asimismo es fácil de observar a las lagartijas (*Leolaemus pantherinus*).

Ichu

Similar al chilliguar. cabe aclarar que especies el Zorro andino (*Pseudolapex culpeus*) son considerados dentro del registro, dado a que estas especies tienen grandes desplazamientos. Ver Figura 25.



Figura 25. Ichu

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización estructural de la zona de estudio

4.1.1. Aspectos litológicos

En la zona de estudio, los taludes del tajo presentan una altura que varía desde los 22 metros hasta los 42.9 metros. Ver plano de perfiles del tajo Anexo 01, Plano 01-4.

Los materiales estériles que conforman los taludes está dada por la roca volcánica intrusiva denominada pórfido diorítico y en los taludes de ingreso al proyecto está dada por la roca sedimentaria limolita. Pórfido diorítico roca intermedia es un intrusivo subvolcánico silicificado en una matriz de arcilla producto de la alteración, fenocristales de feldespato, con presencia de plagioclasa y textura microcristalina seriada con niveles blanquecinos, también se aprecian pequeños cristales de cuarzo en su estructura, tienen una matriz arcillosa, textura de grano medio a fino. Principales componentes de arcillas, feldespatos, anfíboles y cuarzo, que conforman las zonas 1, 2 y 3. La roca limolita son rocas sedimentarias detríticas, es decir que las partículas que le dieron origen mantuvieron su integridad física durante su transporte, posteriormente se acumularon capas sedimentarias que con el tiempo se compactaron para dar lugar a la limolitas. Contienen óxidos de hierro y feldespatos, que conforma la zona 4 de estudio.

4.1.2. Zonificación geotécnica

Los taludes se han sectorizado en zonas geológicas o dominios estructurales que poseen características litológicas y estructurales particulares. Teniendo en cuenta los aspectos litológicos, alteración, grado de intemperismo y calidad del macizo rocoso, se

han definido 04 dominios estructurales en los taludes del proyecto. Ver Tabla 20. Ver en el anexo 01, Plano 01-5.

Tabla 20.
Zonificación geotécnica.

Dominio	Tipo de roca
D (I)	Pórfido diorítico alterado
D (II)	Pórfido diorítico alterado
D (III)	Pórfido diorítico alterado
D (IV)	Limolita

4.1.3. Caracterización estructural

Para la caracterización estructural de las 4 zonas de estudio, se registraron los datos a partir del mapeo geotécnico de campo de los afloramientos rocosos. Los mapeos geotécnicos de afloramientos rocosos se llevaron a cabo utilizando el método lineal por detalle. Representada por un tramo de extensión variable de la roca expuesta, el cual se presenta en el Anexo 03, en los cuales se incluyen: buzamiento, dirección de buzamiento, RQD (Rock Quality Designation), espaciamiento, persistencia, apertura, rugosidad, relleno, meteorización y agua en las discontinuidades.

4.1.3.1. Buzamiento

Los valores de buzamiento obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 05, agrupados según las familias de discontinuidades correspondientes, resumidos los valores obtenidos en la siguiente Tabla 21.

Tabla 21.
Buzamiento

Zona	Familia	Buzamiento
	1	77
Zona 1	2	80
	3	66
Zona 2	1	59

		2	79
		3	46
		4	84
		1	47
	Zona 3	2	74
		3	84
		1	52
	A	2	44
		3	40
	Zona 4	1	69
		2	56
	B	3	52

4.1.3.2. Dirección de buzamiento

Los valores de dirección de buzamiento obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 05, los valores de las direcciones de buzamiento son distintos para cada familia, resumidos los valores en la siguiente Tabla 22.

Tabla 22.
Dirección de buzamiento.

Zona	Familia	Dirección de buzamiento
	1	89
Zona 1	2	350
	3	153
	1	139
Zona 2	2	349
	3	262
	4	37
	1	53
Zona 3	2	203
	3	112
	1	152
Zona 4	A	24
	3	322

	1	163
B	2	64
	3	351

4.1.3.3. Espaciamiento de estructuras

Los valores de espaciamiento de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03. El espaciado de las estructuras presentes en los taludes del proyecto en mayor porcentaje las describimos con un espaciado separado ya que tenemos valores entre 0.30 m hasta 14.40 m. Tomamos en consideración que estos espaciados limitan bloques de tamaño grande que caen de partes más altas al pie del talud, resumidos los valores en la siguiente Tabla 23.

Tabla 23.
Espaciamiento de estructuras.

Zona	Espaciamiento promedio (m)
1	3.03
2	3.03
3	4.04
4	5.66

4.1.3.4. Continuidad de estructuras

Los valores de continuidad de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, La continuidad de las estructuras presentes en los taludes del proyecto en mayor frecuencia corresponden a una persistencia media a alta en un intervalo de 1 m a 30 m de longitud, siendo estas medidas de importancia considerable para la determinación de los tamaños de bloque a caer más frecuentes. La presencia de persistencias mayores de 20 m indica la presencia de estructuras que controlaran los modos de falla estructural en los taludes, resumidos los valores en la siguiente Tabla 24.

Tabla 24.
Continuidad de estructuras.

Zona	Continuidad promedio (m)
1	7.15
2	8.70
3	13.47
4	9.09

4.1.3.5. Apertura de estructuras

Los valores de apertura de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, la apertura de las estructuras presentes en los taludes del proyecto está definida de manera variable tenemos desde aperturas angostas hasta muy abiertas. resumidos los valores en la siguiente Tabla 25.

Tabla 25.
Apertura de estructuras.

Zona	Descripción
1	Muy abierta, abierta, angosta
2	Muy angosta, abierta
3	Muy angosta, abierta
4	Muy abierta, abierta, angosta

4.1.3.6. Rugosidad

Los valores de rugosidad de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, Este parámetro es muy importante ya que controla la estabilidad estructural de los bloques presentes en los taludes del proyecto. Relacionándose a dos parámetros de estabilidad fundamentales; el ángulo de fricción y la cohesión de las estructuras o discontinuidades, resumidos los valores en la siguiente Tabla 26.

4.1.3.7. Relleno

Los valores de relleno de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, también es importante recordar que como los rellenos se encuentran en

las aperturas de las discontinuidades, cuando no existe apertura no hay presencia de relleno alguno y estas estarán en relación al número de aperturas cerradas presentes en los taludes del proyecto que siga estable, resumidos los valores en la siguiente Tabla 27.

Tabla 26.
Rugosidad.

Zona	Descripción
1	Rugoso, ligeramente rugoso, lisa
2	ligeramente rugoso, lisa
3	Rugoso, ligeramente rugoso, lisa
4	Muy rugoso , rugoso, ligeramente rugoso, lisa

Tabla 27.
Relleno.

Zona	Descripción
1	Ninguna, blando <5mm, blando >5mm
2	blando <5mm, blando >5mm
3	Ninguna, duro >5mm, blando <5mm, blando >5mm
4	Ninguna, duro <5mm, duro >5mm, blando <5mm, blando >5mm

4.1.3.8.Meteorización de las juntas

Los valores de meteorización de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, la zona de estudio son los taludes producto de la explotación del mineral de óxido de hierro, no presentan alteraciones visibles. las características de meteorización que prevalecen son de un grado ligero a moderado, resumidos los valores en la siguiente Tabla 28.

Tabla 28.
Meteorización de las juntas.

Zona	Descripción
1	Ligeramente, moderadamente
2	Ligeramente, moderadamente
3	Moderadamente
4	Moderadamente, altamente

4.1.3.9. Agua en discontinuidades

Los valores de agua en las discontinuidades de estructuras obtenidos en campo por zonas se presentan en el Anexo 03, como indicamos en las generalidades de la zona de estudio tenemos dos estaciones muy marcadas, la sequía y una temporada de precipitaciones, si consideramos las peores condiciones para la inestabilidad de los taludes tomaremos que todas las discontinuidades casi verticales estarán secas ya que no tendrán la capacidad de almacenar agua, más al contrario el agua discurrirá fácilmente y consideramos ligeramente húmedas cuando estas tienen ángulos que tienden a la horizontalidad, siendo las condiciones presentes de húmedo. Ver Tabla 29.

Tabla 29.
Agua en discontinuidades.

Zona	Descripción
1	Húmedo
2	Húmedo
3	Húmedo
4	Húmedo

4.1.3.10. Angulo de fricción

El valor del ángulo de fricción básico se obtuvo en laboratorio, el cual es roca pórfido diorítico 46.73° y limolita 43.88° en promedio. Ver resultados en el Anexo N°07.

4.1.3.11. Cantidad de rebotes con martillo schmitd

Tabla 30.
Cantidad de rebotes con martillo schmitd de roca pórfido diorítico.

		Pórfido Diorítico					Promedio
Schmitd Rebound -Wet	r	31	29	22	24	45	33.3
		46	41	30	39	26	
Schmitd Rebound -Dry	R	31	34	25	23	43	35.5
		48	45	33	43	30	

Tabla 31.
Cantidad de rebotes con martillo schmitd de roca limolita.

		Limolita				Promedio
Schmitd Rebound -Wet	r	33	32	24	33	24
		24	39	27	41	43
Schmitd Rebound -Dry	R	34	33	30	37	23
		25	42	27	41	45

4.1.4. Caracterización geotécnica

4.1.4.1. Índice de designación de la calidad de la roca (RQD).

Los resultados obtenidos de los RQD calculados con los datos de número de fisuras por metro lineal, se presentan los resultados en la siguiente Tabla 32.

Tabla 32.
Valores del RQD.

Zona	RQD promedio
1	59.0
2	78.5
3	54.1
4A	79.5
4B	87.4

4.1.4.2. Sistema de clasificación de Bieniawski(1973)

El uso del índice RMR permite calificar la calidad geotécnica de los macizos rocosos en una escala que varía desde 0 a 100, y considera 5 clases:

Tabla 33.
Valores del RMR.

Zona	RMR promedio	Clase	Calidad del macizo rocoso
1	52.8	III	Regular
2	56.8	III	Regular
3	49.1	III	Regular
4A	57.9	III	Regular
4B	57.0	III	Regular

Los resultados obtenidos de los valores de RMR obtenidos de las 4 zonas de mapeo geotécnico se presentan en el Anexo 03, teniéndose valores muy similares en las zonas 01, 02, 03 y 04.

Estos valores representan que el macizo rocoso que constituye los taludes del proyecto son de regular calidad.

4.1.4.3. Sistema de clasificación GSI

Los resultados obtenidos de los valores de GSI obtenidos de la correlación con el RMR, para cada una de las zonas mapeadas en la siguiente Tabla 34.

Tabla 34.
Valores de GSI.

Zona	GSI promedio
1	47.8
2	51.8
3	44.1
4A	52.9
4B	52.0

El resumen los valores de GSI promedio representan que el macizo rocoso que constituye los taludes del proyecto es de regular calidad.

4.1.5. Valoración geotécnica de estructuras.

4.1.5.1. Criterio de resistencia generalizado Barton – Brandis.

Se presenta en la siguiente Tabla 35 los datos resistencia de la estructura por el criterio generalizado de Barton – Brandis.

Tabla 35.

Datos resistencia de la estructura por el criterio generalizado de Barton – Bandis.

Zona	ϕ_r	JRC	JCS (Mn/m ²)	Peso unitario (MN/m ³)	Altura (m)	Cohesión (Mpa)
1	45.49	5.5	35.55	0.0185	32.0	0.045
2	45.49	3.6	43.65	0.0215	42.9	0.034
3	45.49	4.4	32.55	0.0171	25.1	0.024
4	42.83	7.6	38.91	0.0206	15.1	0.047
	42.83	6.4	38.91	0.0206	15.0	0.031

4.1.6. Valoración de roca intacta.**4.1.6.1. Propiedades físicas****Peso Específico (ρ)**

Se define como la masa del material por la unidad de volumen, la misma que comprende los eventuales espacios vacíos, se expresa en gramo por centímetro cubico (g/cm³) o en toneladas por metro cubico (ton/m³).

$$\rho = (\text{Peso seco} / \text{Volumen}) \times 9.81 \text{ m/sg}^2$$

En la siguiente Tabla 36 se muestra los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Tabla 36.

Resultado de densidad de roca intacta.

Parámetro estadístico	Densidad (g/cm ³)			
	S 1 - 1'	S 2 - 2'	S 3 - 3'	S 4 - 4'
Valor máximo, MAX	1.97	2.26	1.78	2.13
Valor mínimo, MIN	1.79	2.14	1.71	2.09
Mediana, MED	1.85	2.20	1.76	2.1
Valor Promedio, MEAN	1.88	2.19	1.75	2.1
Desviación estándar, SDEV	0.08	0.04	0.03	0.01
Coficiente de Variación, CV	0.2	0.53	-0.33	2.04

Porosidad (η)

Se expresa por la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total de la muestra.

Ver Tabla 37.

$$\eta = V_v / V_t$$

Donde:

V_v = es el volumen de vacíos

V_t = es el volumen total.

Expresándolo en términos porcentuales

$$\% \eta = ((\text{Peso saturado} - \text{Peso seco}) / \rho_w \times \text{Volumen}) \times 100\%$$

Dónde: ρ_w = es la densidad del agua.

Tabla 37.
Porosidad de rocas.

Parámetro estadístico	Porosidad (%)			
	S 1 - 1'	S 2 - 2'	S 3 - 3'	S 4 - 4'
Valor máximo, MAX	43.08	20.94	32.61	19.98
Valor mínimo, MIN	29.97	15.13	20.55	10.56
Mediana, MED	38.04	18.04	24.83	16.66
Valor Promedio, MEAN	37.54	17.75	25.26	16.28
Desviación estándar, SDEV	5.36	2.40	4.65	3.56
Coefficiente de Variación, CV	-0.56	0.22	1.10	-1.18

4.1.6.2. Propiedades de resistencia**Resistencia a la compresión simple**

Para obtener la resistencia al esfuerzo uniaxial, es necesario realizar el ensayo de compresión simple. Este ensayo consiste en someter una probeta cilíndrica, de relación (altura / diámetro) = 2, a un esfuerzo axial P, (compresión simple creciente). Eventualmente, se puede utilizar una probeta de forma de paralelepípedo. En este ensayo se tiene un esfuerzo lateral nulo, solo el esfuerzo axial es entonces aplicado en la muestra. El ensayo se realizó con los equipos: equipo de compresión simple, balanza graduada,

vernier, sonda saca testigos y cortadora de muestras. El testigo no debe de tener fracturas.

Se realizó con los procedimientos siguientes:

- Dimensionar la probeta, se medirá el diámetro en ángulo recto y la altura del cilindro.
- Pesar la muestra.
- Situar la muestra en la prensa hidráulica. La velocidad de la carga fue a 1,0 MPa/s.
- Dar lectura realizada por el equipo, las condiciones y modo de ruptura del testigo.

Los resultados de los testigos ensayados por el laboratorio se adjuntan en el Anexo N° 07, los cuales fueron obtenidos de las zonas estudiadas.

Tabla 38.
Compresión simple de núcleos de roca.

Parámetro estadístico	UCS (Mpa)		
	S 2 - 2'	S 3 - 3'	S 4 - 4'
Valor máximo, MAX	20.99	5.49	9.52
Valor mínimo, MIN	9.98	1.58	5.88
Mediana, MED	15.55	2.95	7.99
Valor Promedio, MEAN	15.12	3.29	7.94
Desviación estándar, SDEV	4.23	1.59	1.17
Coefficiente de Variación, CV	0.27	0.58	-0.47

4.2. Análisis de estabilidad de taludes

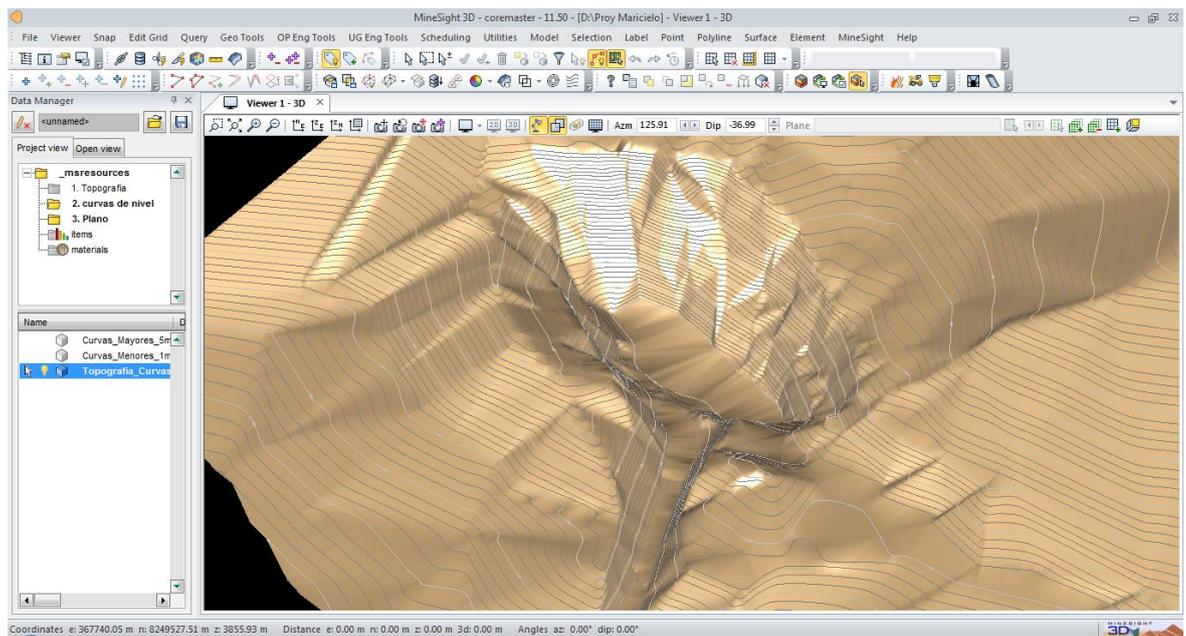


Figura 26. Simulación en 3D del área de estudio.

Los taludes se dividen en estables o inestables. Para un cierre de minas los taludes deben ser estables, tienen que poseer un coeficiente de seguridad superior a 1.5.

Para ello en el proyecto de investigación se realizará el análisis de estabilidad de taludes. Para la elección correcta del método de análisis a utilizar, se deberá de tener las siguientes consideraciones: Etapa del proyecto, confiabilidad de los análisis de estabilidad y el efecto escala.

Para el estudio se realizará el análisis de estabilidad de taludes por los métodos, estereográfico o cinemático y equilibrio límite, para conocer si es estable o inestable.

El análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático nos ayuda a identificar la predisposición de los bloques a fallar (Planar y Cuña) en los taludes. Por lo cual el método a utilizar para la estabilidad de taludes es de equilibrio límite, el cual

trabaja con datos de parámetros geométricos y geotécnicos del talud, obteniendo valores como el factor de seguridad y la probabilidad de falla los cuales hacen más confiables los resultados.

La identificación si un talud es estructuralmente controlado o no lo es, nos ayudará a identificar el método de análisis de estabilidad que debemos de utilizar. Los métodos de equilibrio límite o analíticos son los más utilizados en los taludes en roca estructuralmente controlados.

A continuación, se describen los resultados obtenidos producto de las investigaciones realizadas y a los análisis de estabilidad por el método equilibrio límite en los taludes del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro.

4.2.1. Análisis de estabilidad por el método estereográfico o cinemático.

Realizar el análisis de estabilidad estereográfico o cinemático es de suma importancia ya que éste nos ayuda a la identificación de los modos de falla más periódicos, no determina el tamaño ni la forma de los bloques, tampoco nos da un valor cuantitativo como el factor de seguridad, pero nos da una representación de cómo podrían deslizarse los bloques que se forman producto a las discontinuidades. Ver anexo 05.

El análisis realizado depende del número de datos de dirección de buzamiento y buzamiento tomados en campo, se consideró los datos de las discontinuidades que tienen mayor persistencia para tener un resultado más aceptable, se realizó por 4 zonas.

El análisis estereográfico para cada uno de los modos de falla es de distinta manera, ya que se generan zonas de inestabilidad sombreadas generalmente de color rojo,

en el estereograma se encuentran polos en el interior y fuera de las zonas de inestabilidad, estos pueden ser polos de discontinuidad o polos de intersección de planos de discontinuidades según sea en modo de falla estudiado. Se ha empleado cono de fricción (ángulo de fricción interna de la roca real), calculado en gabinete. Es así que los resultados de estos análisis son expresados en porcentajes y cada una de las formas de análisis según sea el modo de falla, se realizó el análisis para cuatro zonas, por tener la presencia de diferentes estructuras.

Tabla 39.

Datos de entrada para el análisis de los modos de falla estructural a través de estereogramas en el software Dips v.6.0 de Rocscience.

Descripción	zona 1	zona 2	zona 3	zona 4	
				A	B
Número de datos	20	11	17	24	
Buzamiento (°)	56	74	73	49	64
Direcc. de buzamiento (°)	20	327	191	227	47
Altura de talud (m)	32	42.9	25.1	15.1	18
Angulo de Fricción (°)	47	47	47	44	44

Modo de falla planar

Para el análisis de modo de falla planar, el software Dips v6.0 genera cada uno de los polos ploteados, un análisis de deslizamiento planar usa conos de fricción, para probar la posibilidad combinada de fricción y cinemática del deslizamiento plano.

Tabla 40.

Resultados del modo de falla planar.

Modo de falla por Planar	Porcentaje
Zona 1	1.90 %
Zona 2	00.00 %
Zona 3	12.50 %
Zona 4	A 00.00 %
	B 7.14 %

Modo de falla por cuña

Para el análisis de modos de falla por cuña, el software Dips v.6.0 genera los planos de cada uno de los polos ploteados y posteriormente identifica todas las intersecciones formadas entre planos en todo el estereograma para considerarlos puntos de intersección, como observamos en la representación estereográfica del Anexo 05, Ver Tabla 41 los resultados para las 4 zonas de investigación.

Tabla 41.
Resultados del modo de falla en cuña.

Modo de falla por Cuña	Porcentaje
Zona 1	1.90 %
Zona 2	6.67 %
Zona 3	19.17 %
Zona 4	A 0.00 % B 15.38 %

Modo de falla por vuelco flexural

El análisis estereográfico para este modo de falla flexural se presenta en el Anexo 05, en el cual se observa un porcentaje de 0.00% para las 4 zonas de estudio.

Tabla 42.
Resultados del modo de falla por vuelco flexural.

Modo de falla por vuelco flexural	Porcentaje
Zona 1	00.00 %
Zona 2	00.00 %
Zona 3	00.00 %
Zona 4	00.00 %

Modo de falla por vuelco directo

Tomando en consideración las 4 zonas de estudio con sus respectivos puntos de intersección de planos ploteados, se tiene en la zona 3 el modo de falla por vuelco directo con un porcentaje de 21.67%.

Tabla 43.
Resultados del modo de falla por vuelco directo

Modo de falla por vuelco directo		Porcentaje
Zona 1		0.00%
Zona 2		0.00%
Zona 3		21.67%
Zona 4	A	0.00%
	B	14.29%

Los resultados de las tablas anteriores representan fallas en los taludes del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro: falla estructural tipo planar con un porcentaje de 12.50% para la zona 3, falla estructural tipo cuña con un mayor porcentaje de 19.17% para la zona 3 y con un porcentaje 6.67% para la zona 2, falla estructural por vuelco directo con un porcentaje de 21.67% para la zona 3. Por consiguiente, se realizaron los análisis de estabilidad de taludes por el método de equilibrio límite o analítico tomando en consideración los resultados del análisis cinemático, por lo cual se recurrió al software que ayudará a cuantificar la estabilidad de talud con un factor de seguridad.

4.2.2. Análisis de estabilidad por el método equilibrio límite o analítico.

Estos métodos de análisis son utilizados generalmente en los análisis de estabilidad en roca estructuralmente controlada, es decir la estabilidad del talud es controlada por la resistencia que ofrecen las estructuras, es así que calculamos los valores de resistencia para cada uno de las familias de discontinuidades tomando en consideración el criterio de resistencia de Barton – Bandis.

La estabilidad de un talud considera la determinación de un factor de seguridad a la falla de la estructura. Por ello es obligatorio conocer los parámetros tanto geométricos del talud, como geotécnicos del material que compone el talud. Una vez determinada la cinemática de falla del talud, el siguiente camino es realizar un análisis de estabilidad

utilizando el método del equilibrio límite para comparar las fuerzas resistentes, con las fuerzas deslizantes del movimiento. Conocido el rango o diferencia entre estos dos grupos de fuerzas se podrá establecer el factor de seguridad para la estabilidad del talud.

Para cumplir con el análisis de equilibrio límite se tienen los parámetros de análisis para un modo de falla cuña y planar, se realizó el análisis de estabilidad en el software Rocplane y Swedge, ingresando los datos presentados en la Tabla 44. con lo que respecta a los datos del talud, propiedades físicas y coeficiente sísmico.

Tabla 44.

Datos geométricos del talud, propiedades físicas y coeficiente sísmico para el análisis de estabilidad con el software RocPlane y Swedge.

Zona	Ángulo de talud (°)	Altura de talud (m)	Direcc. Buz. Talud (°)	Peso específico roca (kN/m ³)	Peso unitario agua (kN/m ³)	Coefficiente sísmico (g)
Zona 1	56	32	20	18.46	1	0.165
Zona 2	74	42.9	327	21.50	1	0.165
Zona 3	73	25.1	191	17.15	1	0.165
Zona 4	49	15.1	227	20.60	1	0.165
	64	18	47	20.60	1	0.165

Tabla 45.

Datos de las propiedades de resistencia de las discontinuidades, para el análisis de estabilidad por rotura planar y cuña

Zona	Buzamiento (°)	Dirrec. Buz. (°)	Espaciamiento (m)	JRC	JCS (MN/m ²)	ϕ_r (°)
Zona 1	56	20	3.06	5.5	35.55	45.49
Zona 2	74	327	3.10	3.6	43.65	45.49
Zona 3	73	191	4.04	4.4	32.55	45.49
Zona 4	49	227	7.53	7.6	38.91	42.83
	64	47	4.47	6.4	38.91	42.83

Análisis de falla planar

La falla plana se produce a favor de la superficie preexistente, que puede ser una estratificación, una falla u otro tipo de discontinuidad. Este deslizamiento se puede

producir a lo largo de una superficie plana. Hoek & Bray, (1981) indican las condiciones cinemáticas y mecánicas que deben cumplirse para que se produzca este tipo de falla . Primero, la superficie de falla corresponde a un plano continuo que debe tener un rumbo paralelo o casi paralelo a la superficie del talud, sin diferir en más de $\pm 20^\circ$. Segundo, la superficie de falla debe buzarse hacia el exterior del talud, debe ser menor que el buzamiento de la superficie del talud. Tercero, el buzamiento de la superficie de falla debe ser mayor que el ángulo de fricción en este plano. Y cuarto, las superficies laterales que separan el plano deslizante deben tener una resistencia despreciable frente al conjunto talud y plano de falla. En la Tabla 46, se muestran los resultados obtenidos por el software Rocplane.

Tabla 46.

Resultados del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite de un talud por rotura planar con el software Rocplane de Rocscience.

Zona	Altura de talud (m)	Angulo de talud ($^\circ$)	Plano de falla ($^\circ$)	Factor de Seguridad (Estático)	Factor de Seguridad (Pseudoestático)	Condición
Zona 3	25.1	73	56	1.099	0.763	Inestable
	25.1	73	70	0.704	0.382	Inestable

Los resultados indican que la zona 3 presentan dos discontinuidades inestables en los análisis estáticos y pseudoestático debido que los factores de seguridad de los mismo son inferiores a 1.5 y 1.1 respectivamente, éste se encuentra ubicado tomando en cuenta la longitud del talud, aproximadamente en el medio, es la zona que tiene el mayor ángulo de inclinación y es la zona más alta. Ver el Anexo N°06.

Análisis de falla en Cuña

Dentro de las condiciones para el análisis cinemático de la falla en cuña se debe considerar que el rumbo de la línea de intersección de los planos debe ser cercano al rumbo de la cara del talud. El buzamiento de la línea de intersección debe ser menor al

buzamiento de la superficie de talud. Y el buzamiento de la línea del talud debe ser mayor que el ángulo de fricción promedio entre las dos superficies. (Hoek & Bray, 1981), los resultados de los análisis realizados se muestran en el Anexo N°06 y sus resultados son plasmados en la Tabla 47.

Tabla 47.

Resultados del análisis de estabilidad por el método de equilibrio límite de un talud por Cuña con el software Swedge de Rocscience.

Zona	Altura de talud (m)	Angulo de talud (°)	Factor de Seguridad (Estático)	Factor de Seguridad (Pseudoestático)	Condición
Zona 1	32	56	54.29	45.19	Estable
Zona 2	42.9	74	3.074	2.592	Estable
Zona 2	42.9	74	1.726	1.452	Estable
Zona 2	42.9	74	6.702	5.163	Estable
Zona 3	25.1	73	1.624	1.346	Estable
Zona 3	25.1	73	2.399	2.013	Estable

Como el FS es una medida determinista, la incertidumbre en su valor generalmente se explica estableciendo un valor mínimo de aceptación de diseño prescrito. Los criterios de aceptación en la industria minera para la escala de talud global alta, FS mínimo en condiciones estáticas es de 1.5 y FS mínimo en condiciones pseudoestáticas es de 1.1. según (Read & Stecy, 2009). Los resultados de la Tabla 47, indican que los factores de seguridad son aceptables y están en condición de estable.

Realizado los análisis en los softwares ahora vamos a proponer nuevos ángulos de talud para la zona que han presentado inestabilidad el cual es la zona 3. Así ver si ello conllevaría a ser revegetado. Y poseer un factor de seguridad aceptable en condiciones estáticas.

Análisis e interpretación de datos

El ángulo propuesto en la Tabla 48, para la zona 3 son los mínimos, para poder lograr la estabilización de talud geotécnicamente.

Tabla 48.

Ángulos propuestos para zonas inestables.

Zona	Ángulo de talud (°)	Ángulo de talud propuesto (°)
Zona 1	56	56
Zona 2	74	74
Zona 3	73	53
Zona 4	49	49
	64	64

4.3. Identificación de la cobertura

Para un cierre final de un tajo se propone la condición de ningún cuidado "Walk Away" después del término de las actividades de cierre y así controlar la degradación del ambiente con una revegetación adecuada.

4.3.1. Clima

Las temperaturas más altas en condición del altiplano se presentan en el mes de noviembre y las temperaturas medias mínimas más bajas son registradas en los meses de verano durante enero y febrero, en tanto que las temperaturas más bajas se presentan en invierno durante los meses de junio y julio registrando valores altos en los meses de verano enero, febrero y marzo.

En relación con los procesos de inestabilidad, la cantidad y distribución de la precipitación durante el año, el tipo y densidad de la cobertura vegetal y el balance hídrico, constituyen los factores climáticos de mayor interés.

4.3.2. Descripción de las características físicas del suelo.

El suelo es un recurso natural que debe ser estudiado por medio de su perfil, constituido por diferentes capas u horizontes. El estudio del perfil y de las características eco-geográficas del lugar permite una mejor comprensión del recurso.

Descripción de las unidades de mapeo

En el área del proyecto en estudio se ha identificado solo un grupo de capacidad de uso mayor de suelos: tierras aptas para pastos (P).

Clasificación de las Tierras por su Capacidad de Uso Mayor

La clasificación de tierras por su Capacidad de uso mayor representa la más alta abstracción, agrupando suelos de acuerdo a su vocación máxima de su uso. Reúne los suelos que presentan características y cualidades en cuanto a su aptitud natural para la producción.

En la actualidad en el área del tajo 1 hay una mínima cantidad de vegetales que están en proceso de adaptación en la desintegración de roca, lo cual será de mucha ayuda para poder proponer las especies vegetales a utilizar.

En la exploración de campo se realizaron con las mediciones de tajos. Esto se realizó mediante el levantamiento de un perfil estratigráfico representativo cuya altura fue de 11 y 16 metros, cuyas características son las siguientes. Ver Figura 28 y 29. Se registró el perfil estratigráfico del suelo en cada tramo, (procedimiento mediante mediciones con wincha). Se constituye un perfil estratigráfico por la clase, espesor y disposición de los horizontes y las formas observables a simple vista.

Para la descripción del suelo se tomó en consideración la descripción del sitio (el clima seco, con presencia de heladas, con temperaturas por debajo de los 10° y descripción usos del suelo, los usos del suelo en sus alrededores son para pastos, hay presencia de roca caliza y material cuaternario).

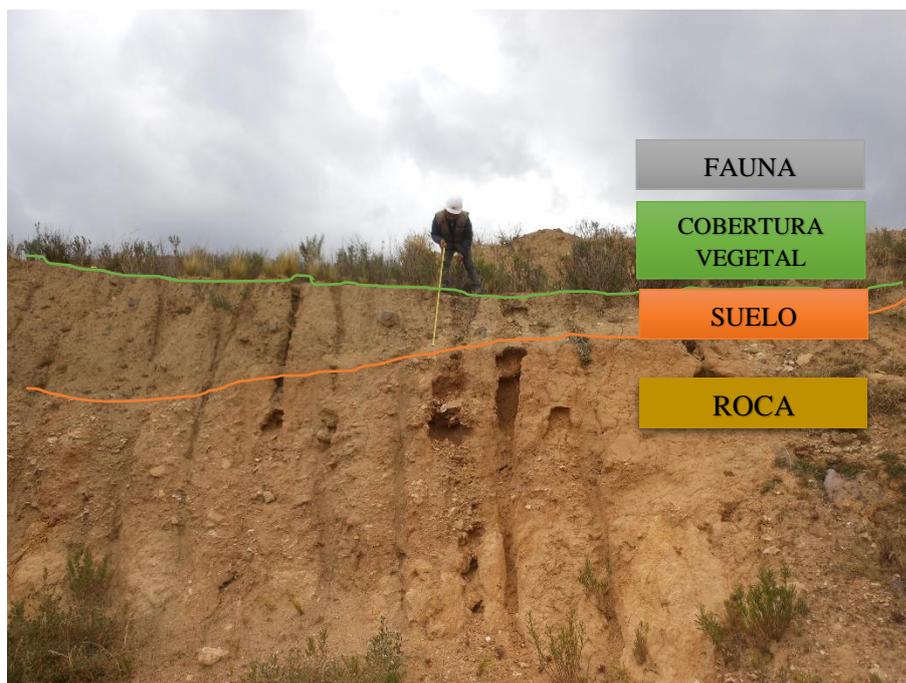


Figura 27. Vista de perfil del suelo de la zona 1.



Figura 28. Vista de perfil del suelo de la zona 4.

La clasificación de uso mayor de tierras se determinó siguiendo las pautas del reglamento de clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor (Decreto Supremo N° 017-2009-AG). Este reglamento considera tres categorías y estos son; grupos de

capacidad de uso mayor clases de capacidad (calidad agrologica) y sub clases de capacidad (factores limitantes). (GORE-PUNO, 2014)

Tabla 49.
Capacidad de uso mayor de tierras.

Grupo		Clase		Sub - clase	
Símbolo	Uso mayor	Símbolo	Calidad agrícola	Símbolo	Factores limitantes
P	Tierras aptas para pastoreo	P3	Baja	P3se	Restricciones por suelo y erosión

Fuente: AG, 2009

Según la Tabla 49, representan las tierras no aptas para propósitos agrícolas, pero reúnen características ecológicas para la propagación de pasturas naturales.

Calidad de cobertura vegetal

Para un cierre de minas se debe de considerar una cobertura vegetal que tenga el menor porcentaje de infiltración que evite el mayor contacto con la roca, las rocas en estudio son Pórfido diorítico y limolita, las cuales deben ser cubiertas por una capa de suelo. Para tener conocimiento de las propiedades del suelo que existe en la berma de la zona 1 y suelo de la zona 4, se realizó la toma de muestra en el mes de julio, el cual fue llevado para realizar una caracterización de suelos de las rocas en desintegración que se encuentra con vegetación.

Los resultados se mostrarán en el Anexo 08, los cuales fueron realizados en el laboratorio de agua y suelos de la Escuela profesional de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional del Altiplano Puno. Las muestras que se analizaron se aprecian en la Figura 30.



Figura 29. Muestras para caracterización.

Los resultados de la caracterización de suelos

En la textura una alta proporción de arena en el suelo resulta en baja fertilidad y alta velocidad de infiltración con poca retención de humedad, por el contrario, una alta proporción de arcilla, armoniza con un bajo contenido de materia orgánica, facilita las condiciones de compactación, y reduce la infiltración de agua, resultando en mayores pérdidas por escorrentía. Por lo tanto la textura más denominada franca. (Rodríguez & Rodríguez, 2015), económicamente no es rentable la modificación de la textura, sin embargo en prácticas de manejo, como la adición de materia orgánica, es posible lograr las condiciones óptimas para la vegetación. Ver resultados en la Tabla 50.

Tabla 50.
Características del suelo.

Clave de campo	Análisis mecánico			Clase textural
	Arena %	Arcilla %	Limo %	
Muestra 01 (Pórfido Diorítico)	52.45	24.00	23.55	Franco arcillo arenoso
Muestra 02 (Limolita)	51.60	29.40	19.00	Franco arcillo limoso

Fuente: Laboratorio de aguas y suelos.

Materia orgánica nutrientes del suelo

Los resultados en la Tabla 51, se identifica como materia orgánica baja por no contener restos orgánicos que pueden dar lugar a aumentar el contenido en nutrientes del suelo hacia las especies vegetales, incrementa la fertilidad de suelo y su estructura.

Tabla 51.
Materia orgánica.

Clave de campo	M.O. (%)	Identificado
Muestra 01	2.90	Bajo
Muestra 02	3.54	Bajo

pH

Los resultados en la Tabla 52, identifican al pH como neutro y básico se considera suelos óptimos para cultivos según (Rodríguez & Rodríguez, 2015), si $\text{pH} > 7.6$, es probable que los nutrientes como el hierro, cobre, manganeso y zinc nose encuentran en cantidades suficientes para ser absorbidas por las plantas.

Tabla 52.
pH.

Clave de campo	pH	Tipo	Observación	Identificado
Muestra 01	7.37	Neutro	Buena disponibilidad de Ca y Mg.	Suelo óptimo para cultivos
Muestra 02	7.74	Básico	Posible exceso de Ca, Mg y carbonatos.	Suelos generalmente con CaCO_3

Fósforo aprovechable

Los resultados de la Tabla 53, de contenido de fosforo aprovechable identificado de bajo nivel para la vegetación con especies para ello el suelo tiene que tener la adición de fertilizantes fosfatados, la probabilidad de respuesta a la aplicación de un fertilizante fosforado es alta.

Tabla 53.
Fósforo aprovechable.

Clave de campo	P (ppm)	Identificado
Muestra 01	5.55	Bajo nivel de fósforo
Muestra 02	6.16	Bajo nivel de fósforo

Capacidad de intercambio atómico (C.I.C.)

En los resultados de la Tabla 54, de capacidad de intercambio atómico identificado como suelo pobre que necesita de materia orgánica para poder contar con revegetación.

Tabla 54.
Capacidad de intercambio atómico.

Clave de campo	CIC (me/100g)	Nivel	Observaciones
Muestra 01	11.15	Media	Suelo pobre: necesita aporte de materia orgánica.
Muestra 02	16.90	Media	Suelo pobre: necesita aporte de materia orgánica.

Bases intercambiables

Tabla 55.
Bases intercambiables.

Clave de muestra	Cationes intercambiables me/100g	Identificado
Muestra 01	Ca	5.15 Medio
	Mg	2.40 Medio
	K	0.10 Bajo
	Na	0.08 Aceptable
Muestra 02	Ca	6.10 Medio
	Mg	2.90 Medio
	K	0.12 Bajo
	Na	0.11 Aceptable

Saturación por bases

Los resultados de la Tabla 56, de saturación por bases se identificó al suelo medio cuya riqueza dependerá del valor de C.I.C. total, es menor en suelos ácidos y cercanos al 100% en suelos básicos. Cuanto mayor sea el grado de saturación más posibilidades tiene el suelo para retener cationes.

Tabla 56.
Saturación por bases.

Clave de campo	S.B (%)	Observaciones
Muestra 01	61.42	Suelo medio: su riqueza dependerá del valor de C.I.C. total.
Muestra 02	54.62	Suelo medio: su riqueza dependerá del valor de C.I.C. total.

Conductividad eléctrica (C.E.)

Los resultados de la Tabla 57 de conductividad eléctrica identificados como no presentar problemas de salinidad.

Tabla 57.
Conductividad eléctrica.

Clave de Campo	C.E. (mS/cm)	Interpretación
Muestra 01	0.10	No hay problemas de salinidad
Muestra 02	0.21	No hay problemas de salinidad

Además, el manejo inadecuado de la cobertura vegetal, en el corto tiempo, genera problemas de degradación y erosión paulatina, puesto que, la soportabilidad disminuye debido a que el suelo queda sin cobertura expuesto a los factores climáticos, sin ninguna posibilidad de recuperación.

El cierre de minas tiene que ser sostenible y económico, para la cobertura de los taludes se propone que se puedan colocar suelo en la cresta del talud y así con las

precipitaciones de lluvia se trasladaría para cubrir todo el talud, los taludes en estudio no generan acidez.

Por la clasificación de uso mayor de tierras habiendo conocido las restricciones por el suelo y la erosión, se recomienda hacer uso de pasturas naturales existentes en la zona, debido a que el factor topográfico y la superficialidad de los suelos limitan la implantación de pastos de mejor calidad según sean nativos, introducidos y/o cultivados.

4.4. Selección de la especie vegetal

La especie vegetal ofrece una de las mejores protecciones de la superficie, porque el tipo de vegetación y el tipo de proceso de degradación condicionan los beneficios que se deben lograr, ya sea la protección o la estabilización de las pendientes. (Gray & Sotir, 1996). La clase y cantidad de especies vegetales que crecen en un lugar son determinadas por la topografía, clima, exposición, nivel freático, textura, y pH del suelo.

La selección de las especies a utilizar existentes en la zona debe tener similitud biótica. El procedimiento a adoptar para escoger las especies vegetales para la recuperación de áreas degradadas es el siguiente:

- La caracterización del material vegetal en la zona con similitud biótica al área de los taludes, se encontró las especies vegetales ya en proceso de adaptación las cuales se describen en Tabla 58.

Las 06 especies identificadas pertenecen a 06 géneros de 04 familias. Todos ellos hierbas, que están en la berma de la zona 1 y pie de talud de la zona 3.

Tabla 58.
Especies de flora existentes en el tajo.

N°	Clase	Orden	Familia	Género	Nombre científico	Nombre común
01	Rosopsida	Fabales	Fabaceae	Medicago	<i>Medicago polymorpha</i>	Trébol
02	Liliopsida	Poales	Poaceae	Stipa	<i>Stipa ichu</i>	Ichu
03	Magnoliopsida	Asterales	Asteraceae	Senecio	<i>Senecio melanolepis</i>	Qariwa
04	Magnoliopsida	Geraniales	Geraniaceae	Erodium	<i>Erodium cicutarium</i>	Aguja aguja
05	Magnoliopsida	Fabales	Fabaceae	Lupinus	<i>Lupinus Silvestre</i>	Ckera
06	Magnoliopsida	Asterales	Asteraceae	Sonchus	<i>Sonchus oleraceus</i>	Kanachu

- Se evaluó del comportamiento de la vegetación existente; su estado en las zonas geomorfológicas homogéneas, principalmente taludes y laderas, el proceso de recuperación de las áreas vecinas, haciendo énfasis en la respuesta de las coberturas.

Especies identificadas en el tajo

Medicago polymorpha L. 1791 (Trébol), una leguminosa con forma de trébol de tallos débiles, de 1 a 5 dm de altura, hojas trifoliadas, folíolos obovados, de truncados a retusos en el ápice, con margen aserrado; estípulas laciniadas. Flores de corola amarilla, poco aparentes, en racimos con 3-8 flores, con pedúnculo de longitud variable. Fruto espiralado, de cilíndrico a discoideo, con aguijones laterales más o menos ganchudos y un surco en su base; 1,5 a 4 espiras, la apical más ancha que las restantes. Prefiere suelo calizo. Ver Figura 30. Para su siembra se utilizan las semillas.

Stipa ichu (Reynel, 2012), de raíz fasciculada, tallos con gran macollaje cilíndrico erecto, hojas involutas rígidas, inflorescencia en panícula oblonga, sedosa con espiguillas unifloras. Los pastizales de ichu son vegetaciones distribuidos en diferentes pisos altitudinales, desde los 3500 hasta los 4000 metros de altitud cubriendo planicies y

laderas, en áreas de condiciones semiáridas y de suelos delgados, la especie predominante es *Stipa ichu* que tiene un corto periodo de rebrote. Ver Figura 31.



Figura 30. *Medicago polymorpha*.

La especie ichu prospera en suelos algo secos, en laderas y pie de ladera. (Rosel, et al 1992), uno de los casos más interesantes de adaptación a condiciones edáficas y climáticos extremadamente adversos, ello constituye la gramínea nanofanerófitas *Stipa ichu* que al agruparse tienen la característica de resistencia a la velocidad del viento y protegen al suelo de la erosión eólica. (Choquehuanca, 1984).

Senecio melanolepis (Qariwa), son plantas anuales, bienales o perennes, eventualmente rozomatosas, erectas, decumbentes, con hojas de esteras, a pinnatisectas, enteras o denticulares, con flores de color amarillo, rara vez son solitarias, arbusto pequeño que florece cada año. Ver Figura 32.



Figura 31. Stipa ichu

Erodium cicutarium (aguja aguja), hierba velluda de 5-6 dm de altura, anual, de tallos extendidos (5-60 cm), a menudo fétidos. Hojas pinnaticompuestas, divididos. Las flores, en umbelas, y de color rosáceo, lila o blanco; brácteas amarronadas. Fruto con pico espiralmente retorcido 1-7 cm. Florece de febrero a octubre. Su habitat en terrenos de cultivo y como ruderal. En suelos arenosos y secos. En biológica y ecología se propaga por semilla, el ciclo de vida es anual o bienal. Su fonología es; germina en otoño, florece y fructifica desde mediados de primavera a fines de verano, se encuentra en fruto aún a mediados de otoño. Ver Figura 33.



Figura 32. Senecio melanolepis.



Figura 33. Erodium cicutarium.

Lupinus (Soukup, 1970), el nombre en quechua es “ckera”, Son plantas de tallo erecto, que habitualmente miden entre 0,5 y 1 m de altura. Sus hojas están formadas por un número impar de foliolos y su aspecto es semejante al de una mano. En las especies silvestres prosperan en suelos arenosos, los colores de los pétalos varían desde el blanco al azul intenso, con predominio de tonos azulados y rosados. Tiene la característica de captar y fijar el nitrógeno en los suelos y repeler plagas, razón por la cual son excelentes fertilizantes. (Tapia, 2015)

En los ecosistemas andinos, después de aluviones o movimiento de tierras, lo primero que emerge y cubre el suelo en las parcelas en descanso, lo cual contribuye a la recuperación de la fertilidad del suelo. El crecimiento es postrado o almohadillado, con raíces profundas, las hojas presentan una intensa vellosidad, es pubescente con semillas muy pequeñas. Ver Figura 34.



Figura 34. Lupinus.

Sonchus oleraceus (Kanachu), Es una especie anual o bienal, con tallos erectos, ramificados, huecos y longitudinalmente surcados, generalmente glabros y a menudo de color rojizo, con una eventual roseta basal de hojas y con hojas caulinares abrazadoras.

Ver Figura 35.



Figura 35. Sonchus oleraceus.

- Identificación de los procesos erosivos presentes en las zonas con cobertura vegetal, describiendo sus causas y efectos.
 - En la zona de estudio según el uso mayor de tierra tiene el factor limitante que es el de suelo y erosión, lo cual se da la granizada y los vientos.
- Integración de la cobertura a la dinámica del ámbito.
 - Tenemos conocimiento que las especies vegetales no cumplen en todos los casos las mismas funciones y la propagación depende de las condiciones del

tratamiento de los suelos a proteger, que cuenten con criterios del material en la zona, las distancias de la siembra, forma de propagación y la dominancia frente a otras especies.

Se ha identificado la cobertura y las especies encontradas en el área de investigación una de las variables a considerar son las pendientes de los taludes, los cuales tenemos para la zona 1 un ángulo de talud de 56° , zona 2 un ángulo de talud de 74° , zona 3 un ángulo de talud de 53° , zona 4a un ángulo de talud de 49° y zona 4b un ángulo de talud de 64° , los cuales son estables mediante el análisis geotécnico realizado en la investigación. Sin embargo, por factores de revegetación los ángulos mencionados no deben ser mayores a los 45° en las pendientes de los taludes por tener alta dificultad en el establecimiento de la cobertura vegetal con hierbas según (Ley et al., 2013). Por lo cual se proyecta para la zona 2 y 3 que los ángulos de talud final se tiendan a 45° para ser revegetado, la zona 1 es estable por poseer un factor de seguridad mayor a 1.5 y tener una berma en el cual ya se está en proceso de revegetación.

4.5. Discusiones

Para demostrar el logro de los objetivos y corroborar la demostración de las hipótesis se realiza la discusión de la data proveniente de la investigación bibliográfico y el análisis e interpretación de los resultados del trabajo de campo y gabinete:

- En relación a la caracterización y determinación de los ángulos de talud, (Morales, 2009), el análisis determinístico, según modo de falla para cada uno de los perfiles, entrega factores de seguridad mayores a 1,3 en todos los casos al considerar el ángulo global de diseño.

Para nuestra investigación la caracterización y determinación de los ángulos de talud con el análisis determinístico estático y pseudoestático, según los modos de falla presentado en el talud de las zonas 1, 2 y 4 presentan factores de seguridad superior a 1.5. Se planteó nuevo ángulo de talud para la zona 3, por presentar un factor inferior a 1.5, con los datos de los modos de falla.

- En relación al análisis de estabilidad de roca Valeriano (2016), ha clasificado con los métodos de análisis de estabilidad de taludes en roca: estereográfico, equilibrio límite. El método cinemático o estereográfico debido a que utiliza parámetros como la orientación de familias principales, ángulo de talud y dirección de buzamiento de corte del talud que sirve para definir los modos de falla más recurrentes en el talud, con éste no calculamos factores de seguridad solo porcentajes de predisposición de las estructuras a fallar por un modo de falla típico. Menezes, (2014) realizó análisis cinemáticos para determinar la probabilidad de rotura de cuña, inclinación plana y de bloque en las pendientes, para estos mismos modos de ruptura, se realizaron análisis cinemáticos para pendientes hipotéticas, variando el azimut, el ángulo de la pendiente y la consolidación de los resultados fue posible verificar la alta resistencia de la roca intacta; sin embargo, debido al grado de fractura de la masa rocosa, su resistencia calculada a partir de la clasificación RMR es baja. De estos resultados se concluye que los modos de ruptura de las pendientes operacionales están condicionados por las discontinuidades, En relación con el diseño de taludes. Medina (2014) en una primera etapa realizo un análisis cinemático a fin de identificar los mecanismos de falla a través de las fracturas naturales de la masa rocosa, y en una segunda etapa realizando los análisis de

estabilidad y el diseño de los taludes, utilizando métodos de cálculo apropiados para los mecanismos de rotura identificados.

Para el caso de nuestra investigación de utilizo los métodos de análisis de estabilidad de taludes en roca: estereográfico o cinemático, de lo cual se definió el modo de falla para cada zona de estudio con este no calculamos los factores de seguridad solo porcentajes de predisposición de las estructuras a fallar, el método equilibrio límite o analítico nos proporcionó el factor de seguridad de las estructuras a fallar, de acuerdo a ello se planteó los nuevos ángulos de los taludes para cada zona inestable. con los resultados fue posible verificar la baja resistencia de la roca intacta; sin embargo, debido a la menor cantidad de discontinuidades de la masa rocosa, su resistencia calculada a partir de la clasificación RMR es media.

- Con relación a la inestabilidad de taludes Calderón, (2016) indico que se llegaría a incrementar la estabilidad de taludes finales en el proceso de cierre de mina, propuso la aplicación de diversas técnicas de control de inestabilidad como perfilado con maquinaria pesada, se identificó los factores que producen inestabilidad de taludes en tajos abiertos, los cuales son: influencia de aguas superficiales, condiciones de discontinuidades, efectos sísmicos, calidad del macizo rocoso. Sobarzo, et al (2011) contar con los valores de las propiedades geomecánicas de material donde pueda ocurrir un deslizamiento.

Para el caso de nuestra investigación la estabilidad de taludes es necesaria para cumplir con la estabilidad física que norma el D.S. 033-2005-EM, para ello se

realizará el perfilado de los taludes inestables, considerando las discontinuidades, efectos sísmicos y la calidad del macizo rocoso.

- En relación a las especies y plantas más utilizadas en las áreas degradadas por las actividades de explotación de mineral de hierro Geraldo, et al (2019) en el proceso de recuperación con el uso de la naturaleza florística influyen en el éxito: El clima, la estructura del suelo, la composición química, la iluminación y la disponibilidad de agua son algunos factores que pueden interceptar con la dinámica de recuperación. Aplicar la especie directamente al suelo, el estudio es fundamental en la toma de decisiones técnicas y especies a utilizar. Las familias más citadas fueron Fabaceae, Asteraceae.

Para el caso de nuestra investigación las especies que se encontraron en el tajo fueron las familias Fabaceae, Asteraceae, Poaceas y Geramiaceae, los cuales indican adaptabilidad según Geraldo, et al (2019), a las características del suelo después de la explotación del mineral.

- En relación a las características del suelo para el desarrollo de la revegetación, Paradelo (2013) indica que las propiedades físicas, químicas y biológicas son un problema para el desarrollo de la vegetación natural durante las labores de rehabilitación, siendo el factor limitante la materia orgánica, con un incremento de materia orgánica mejorará las propiedades físicas y la capacidad de retención de agua, aporta nutrientes como el P y N, incrementa la actividad biológica. Tácuna (2016) la revegetación de pastizales pobres con material esquejes de gramíneas nativas obteniendo mejor resultado con *Festuca*

humilior y la incorporación de materia orgánica en forma de orina y estiércol de ovino es una estrategia efectiva para mejorar la condición y función hidrológica del pastizal.

Para el caso de nuestra investigación las características del suelo que fueron analizados, son de la degradación de la roca pórfido diorítico y limolita que se encuentra en los taludes, tienen la materia orgánica como factor limitante para el incremento de la actividad biológica de revegetación. Tienen que incorporarse materia orgánica en forma de estiércol.

- En relación con la vegetación que existe en la comunidad de Chila (1200 ha), Zapana (2019). Se ha identificado siete sitios de especies vegetales dominantes en las cuales se identificó a la especie vegetal de *Stipa ichu* (10,83 %). Mamani (2005) *Stipa ichu* tiene como hábitad en suelos descubiertos, algo degradados y pajonales, se adapta a planicie y ladera, el perfil modal de suelos Inca Huyo con predominancia de *Stipa Ichu* posee una fisiografía de ladera alta, con un horizonte A de 0-12 cm, con pH de 7.1, con raíces finas y medias contenido mediano de materia orgánica. Con relación a la especie nativa para la revegetación para el cierre de minas Carhuaricra (2019) propuso una especie nativa con crecimiento rápido y recubrimiento perenne denominada ichu (*Stipa ichu*).

Para el caso de nuestra investigación se ha identificado las especies vegetales que se han sido debidamente descritas: *Medicago polymorpha*, *Stipa ichu*, *Senecio melanolepis*, *Erodium cicutarium*, *Lupinus Silvestre* y *Sonchus*

oleraceus, lo cual nos indica que *Stipa ichu* si es una especie vegetal que puede ser utilizada como especie vegetal para un cierre de minas del tajo por ser una biota del lugar.

CONCLUSIONES

Se determinó las condiciones de los macizos rocosos: pórfido diorítico y limolita mediante el uso de clasificaciones geomecánicas RMR y GSI dando como resultados macizo rocoso regular, para el análisis de estabilidad se usó el método estereográfico o cinemático, se usó el software Dips, para las cuatro zonas de estudio, dando como resultado de mayor porcentaje la falla de cuña en la zona 2 y 3, para el análisis de estabilidad por el método equilibrio límite o analítico, se usó el software RocPlane y Swedge donde se logró identificar los taludes estables e inestables, en condiciones estáticas y pseudoestáticas, donde pueden presentar rotura. Se consideró un factor de seguridad mínimo de 1.5 en condiciones estáticas, para estabilizar los taludes en cierre de minas final, el análisis de estabilidad de equilibrio límite resultó la zona 3 inestable, para lo cual se planteó la pendiente final del talud para la zona 3, con ángulo de 53° .

Se identificó la cobertura de suelo de la berma de la zona 1, que contiene la degradación de la roca pórfido diorítico, donde se observa vegetación presentan un pH 7.73 neutro es un suelo óptimo para cultivos, suelo que requiere aporte de materia orgánica y con una conductividad eléctrica de 0.10mS/cm indicando que no tiene problema de salinidad. La zona 2 y 3 con ángulos de talud 74° y 53° respectivamente son estables mediante el análisis geotécnico realizado en la investigación. Sin embargo, por factores de revegetación con especies los ángulos de talud mencionados no deben ser mayores a los 45° por tener alta dificultad en el establecimiento de la cobertura vegetal con hierbas según (Ley et al., 2013). Por lo cual se proyecta para la zona 2 y 3 que los ángulos de talud final se tiendan a 45° para ser revegetado, la zona 1 es estable por poseer un factor de seguridad mayor a 1.5 y tener una berma en el cual ya se está en proceso de revegetación. La especie vegetal a ser utilizado para la vegetación será *Lupinus* salvaje ckera, por tener la característica de captar y fijar el nitrógeno en los suelos y repeler

plagas, razón por la cual son excelentes fertilizantes y el crecimiento es postrado o almohadillado, con raíces profundas y *Stipa Ichu* porque son de pisos altitudinales de 3500 hasta 4000 metros de altitud que cubre planicies y laderas de suelos delgadas con un periodo corto de rebrote.

RECOMENDACIONES

Se recomienda el acceso restringido a las personas al tajo del proyecto Maricielo 2003 de óxido de hierro, antes de haberse colocado señalizaciones y paneles informativos, ya que en la actualidad los taludes de la zona 2 y 3 presentan peligro de rotura y realizar zanjas de coronación en la parte alta para derivar las aguas superficiales y esto no afecten la estabilidad del talud.

Se recomienda realizar ensayos de la calidad de agua en campo y laboratorio, para contar con una estabilidad química, ya que existe una laguna en medio del tajo, para ver el comportamiento del agua a lo largo del tiempo, poder ser evaluado y darle un posible uso en un futuro, para un cierre de minas final.

Para realizar siembra de cobertura vegetal se recomienda enriquecer los suelos con nutrientes utilizando materia orgánica (estiércol) y de ser necesario fertilizantes esto ayudara al desarrollo y crecimiento óptimo de las plantas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Administrations, F. H. (1989). *Rock Slopes: Design, Excavation, Stabilization*.
- AG. (2009). Decreto SUPREMO N° 017-2009-AG. *El Peruano*, (Setiembre), 14.Lima.
- Arzúe, J., Alejanor, L., & Perez-Rey, I. (2013). Problemas de Mecánica de Rocas - Fundamentos e Ingeniería de Taludes. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech*, 10, 1–54.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications* (Jonh Wiley and Sons, Inc.).
- Bolaños, A. M., & Monroy, O. M. (2004). Espectros de Peligro Sísmico (Pontificia Universidad la Católica del Perú). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bordehore, L. J. (2010). *Clasificaciones geomecánicas y diseño empirico de sostenimiento* (Segunda Ed). USA.
- Calderón, F. M. (2016). *Control de inestabilidad de taludes del tajo la quinua oeste – Minera Yanacocha, 2016*. Universidad César Vallejo.
- Capucho, R. (2010). *Estudo de estabilidade de taludes da Mina de Tapira-Mg* (Universidade Federal de Ouro Preto. Brasil.). <https://doi.org/oai:localhost:123456789/2359>
- Carhuaricra, M. J. (2019). *Plan de cierre de minas en la Concesión Minera Huáscar 4 de la Empresa Travertinos Leyva*. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Choquehuanca, J. D. (1984). *Mejoramiento de praderas nativas proyecto especial PAMPA II - CE*. Puno-Perú.
- Coppin, N. J., & Richards, I. G. (1990). *Use of vegetation in Civil Engenieering*. Ciria.
- Díaz, M. A., & Rodríguez, J. G. (2017). Estudio de la estabilidad de taludes en roca entre los kilómetros 95 al 97 de la carretera Ciudad de Dios - Cajamarca (Universidad Privada del Norte). Retrieved from <http://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/12738>
- Enviroment, D. of the. (19998). *Landform Desing of rehabilitation*. Western Australia.
- García, C. A., García, M. C., & Agudelo, C. F. (2014). Evaluación y diagnóstico de pasivos ambientales mineros en la cantera Villa gloria en la localidad de ciudad Bolivar Bogotá D.C. *Tecnura*, 18(Diciembre), 90–102. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v18n42/v18n42a08.pdf>

- García, G. (2016). *Influencia de la revegetación con Festuca humilior y la incorporación de fertilizantes en la recuperación de pastizales degradados*. Universidad Nacional Agraria La Molina Lima.
- Garrido, M. S. (1994). Interpretación de Análisis de Suelos. *Hojas Divulgadoras*, 5, 40.
- Geraldo, V., Nascimento, E., & Teles, G. (2019). Espécies vegetais utilizadas em áreas degradadas pela mineração. *Research, Society and Development*, 8(3), 1689–1699. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v8i3.710>
- González, L. I. (2004). *Ingeniería Geológica* (I. Capella, Ed.). Madrid.
- GORE-PUNO. (2014). *Estudio de Suelos y Capacidad de Uso Mayor (Departamento de Puno)*. 136.
- Gray, D., & Sotir, R. (1996). *“Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization” A Practical Guide for Erosión Control*. Jhon Wiley and Sons. New York..
- Guillén, E. C. (2004). *Estabilidad de taludes en los departamentos de Guatemala y alta Verapaz, casos reales*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Matallurgy.London.
- IGME. (1987). *Manuel de Taludes*. 242–246.
- ISRM. (1981). *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring*. (Ed. E.T. Brown. Pergamon Press).
- Ley, F., Pavesi, J. B., Costa, M. A., & Passos, O. J. (2013). Vegetação como instrumento de proteção e recuperação de taludes. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 8(5), 116–124. <https://doi.org/revista.gvaa.com.br>
- López, C. (2002). *Manual de estabilización y revegetación de taludes*. (Segunda). Madrid.
- Mamani, J. H. (2005). *Evaluación edafoagrostológica de tres praderas naturales con predominancia de Festuca dolichophylla, Stipa ichu y Festuca orthophylla en el fundo Inca Huyo Huacollani*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Marcuson, W. (1981). *Moderator’s report for session on Earth dams and stability of slopes under dynamic loads*. Proceedings, International conference on recent advances in Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics.
- Medina, M. F. (2014). *Estudio geomecánico de estabilidad de taludes del tajo Chapi sulfuros*. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa.
- Menezes, D. A. (2014). *Caracterização geotécnica e análise dos modos de ruptura de*

- taludes operacionais em itabirito compacto*. (Universidade Federal de Ouro Preto).
<https://doi.org/oai:localhost:123456789/3690>
- Miller, R. P. (1966). *Engenieering classification and ingex propieties for intact rock*. Ph. D. thesis. Univerdidad de Illinois.EE.UU..
- MINEM. (2005). *Decreto Supremo N°033-2005-EM*. 26.
- Molina, J. P. (2004). *Estudio de estabilidad y tratamiento de deslizamientos - Cancharani*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Morales, M. O. (2009). *Caracterización geotécnica y determinación de ángulos de talud en yacimiento Franke*. Universidad de Chile.
- Moreno, S. E., & Quiroz, K. A. (2018). *Preparacion de compost para la etapa de cierre de mina en el proyecto Cerro Negro minera Yanacocha, 2018*. Universidad Privada del Norte.
- Oyanguren, R., & Leandro, M. (2004). *Mecánica de Rocas: fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Paradelo, R. (2013). Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. *Boletin Geologico y Minero*, 124(3), 405–419. Retrieved from
- Porta, et al. (2011). *Introducción a la edafología: Uso y prtección de suelos*. (Segunda). España: Mundi-Prensa.
- Read, J., & Stecy, P. (2009). Guidelines for open pit slope design. In *American Journal of Orthodontics* (Vol. 56). [https://doi.org/10.1016/0002-9416\(69\)90237-1](https://doi.org/10.1016/0002-9416(69)90237-1)
- Reynel, C. (2012). *Guía de Identificación de las plantas comunes del derecho de vía del ducto de Peru LNG*. 46. Retrieved from https://perulng.com/wp-content/uploads/2016/06/Guia_identificacion_plantas.pdf
- Rodríguez, H., & Rodríguez, J. (2015). *Métodos de análisis de suelos y plantas*. (3ra. Edici). México: Trillas.
- Rosel, J., Choque, J., & Huacan, T. (1992). *Guía de germoplasma de pastos nativos andinos*. convecio PELT/INADE-IC/COTESU.
- Salamanca, R. (2006). *Suelos y Fertilizantes*. Bogota: Universidad Santo Tomas.
- Sobarzo, V., Villalobos, F., & King, R. (2011). Estudio de la estabilidad de taludes en roca meteorizada de la formación Quiriquina. *Obras y Proyectos*, 9, 38–48. <https://doi.org/10.4067/s0718-28132011000100005>
- Suarez, J. (1998). *Estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Colombia: Ingenieria de Suelos Ltda.

- Suarez, L. (2015). *Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterráneas*.
- Tácuna, R. E. (2016). *Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Tapia, M. E. (2015). Mujeres Andinas en Camino: Promoción del producto tarwi de la Provincia de Huaylas hacia el mercado nacional e internacional en el marco rural del desarrollo sostenible” CF 019-2014-FIP. *El Tarwi, Lupino Andino, Primera Ed*, 1–108. Retrieved from <http://fadvamerica.org/wp-content/uploads/2017/04/TARWI-espanol.pdf>
- Valencia, M., & Solís, W. R. (2003). *Memoria descriptiva de la revisión y actualización del cuadrángulo de Puno (32-v)*. Lima: INGEMMET.
- Valeriano, F. A. (2016). *Métodos para el análisis de estabilidad de taludes en roca y su interacción en el cerro espinal Juliaca*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.
- Zapana, J. C. (2019). *Evaluación de pastizales naturales y determinación de la carga animal actual en la comunidad Chila, Puno*. Universidad Nacional del Altiplano Puno.

ANEXOS