

Gian Carlo Ticona Jove

¹ Geomechanics And Environment SAC, Av. Del Parque 122, Ubr. La Planicie La Molina, Lima, Perú
(gticona@geoenv.pel)

RESUMEN

El presente estudio plantea una metodología para realizar el criterio de caracterización geomecánica de macizos rocosos alterados, empleando información geomecánica de la franja metalogénica de Andahuaylas – Yauri, este sector es importante para la industria minera en el Perú, actualmente cuenta con el desarrollo de grandes operaciones mineras y tiene una buena perspectiva para el desarrollo de futuros proyectos mineros. En el cinturón de Andahuaylas – Yauri se tiene yacimientos mineros del tipo pórfido – skarn de Cu, Ag y Au principalmente.

La base de datos utilizada para la caracterización geomecánica y los análisis de estabilidad de macizos rocosos alterados cuenta con 329 sondajes, distribuidos espacialmente con fines de prospección geológica y geotécnica, la clasificación geomecánica utilizada es el RMR de Bieniawski, así también esta base de datos cuenta información de RQD, ensayos de mecánica de rocas como carga puntual, compresión uniaxial, tracción indirecta y corte directo.

Se desarrollaron análisis estadísticos determinísticos para analizar el comportamiento de la distribución de los parámetros geomecánicos; con lo cual se definió las unidades geotécnicas de los macizos rocosos alterados.

La aplicación de la resistencia estimada del ISRM mostró una diferenciación marcada en el parámetro de clasificación geomecánica RMR, lo cual permitió la clasificación geomecánica de los macizos rocosos alterados. La población de los macizos rocosos alterados en la base de datos corresponde al 39%, para macizos rocosos regulares un 55% y para los macizos rocosos de buena calidad el 8%.

Para verificar el impacto de la clasificación geomecánica de macizos rocosos alterados con respecto a la estabilidad de los taludes, se construyeron 72 modelos geotécnicos, dentro de los cuales se consideraron 04 criterios de diseños geométricos de taludes (OVA-IRA), 06 grupos de parámetros de RMR extraídas de los análisis estadísticos y 03 escenarios de condición de agua.

Los análisis de estabilidad se realizaron por los métodos numéricos de diferencia finita generalizada, empleando el modelo constitutivo Hoek Brown Modificado en el software computacional FLAC – Slope v8.

Con los resultados del factor de seguridad se verificó el impacto en la estabilidad que representa los macizos rocosos alterado en el modelamiento geotécnico y se propusieron diseños conservadores con condiciones de agua drenado con la finalidad que se cumpla con los criterios de aceptabilidad.

1. Introducción

En la industria minera mundial han ocurrido eventos de inestabilidad de diferentes magnitudes, algunas de ellas han causado impactos significativos en la seguridad de las personas y con consecuencias severas en la continuidad del negocio de las empresas operadoras, estos eventos indeseados muestran que continuamos adquiriendo conocimientos y mejorando los procesos geotécnicos en la industria.

Ante la ocurrencia de estos eventos en los componentes mineros como pueden ser los tajos abiertos, se realiza la revisión de la información, entre todos los procesos de revisión, también se revisan los estudios técnicos de estabilidad de los diseños, con los cuales se realizaron los procesos constructivos de los taludes en un tajo abierto.

En las revisiones de los eventos de inestabilidad se encuentran varios factores que fueron determinantes y que desencadenaron el desarrollo de las inestabilidades, algunos de estos factores son la presencia de macizos rocosos alterados (de baja resistencia), los cuales, con la combinación con otros factores como la presencia de agua, las fábricas estructurales de diferentes escalas, movimientos sísmicos y procesos de la geodinámica externa; incrementan la probabilidad de falla u ocurrencia.

El presente trabajo propone una metodología para discretizar los macizos rocosos alterados con la aplicación de la resistencia estimada del ISRM y la

clasificación geomecánica de macizos rocosos RMR de Bieniawski.

Se realizaron análisis de estabilidad para 04 diseños con un perfil de 600 metros de altura total (OVA – IRA), en 03 condiciones de presencia de agua (saturada, semi drenada y drenada) para mostrar los efectos de esta metodología propuesta con respecto a la estabilidad de taludes, los análisis de estabilidad se realizaron en el software computacional FLAC-SLOPE v8.1.

Para realizar este trabajo se empleó una base de datos geomecánica que corresponde a la zona metalogenética y minera muy importante del Perú, como es el Batolito de Andahuaylas – Yauri, es importante precisar que cada yacimiento minero es único y contiene sus propias características geomecánicas, estructurales, hidrogeológicas, hidrológicas, sísmicas, entre otras; por lo tanto, los datos y resultados del presente trabajo deben servir de guía para próximos estudios.

El Perú es un país con un alto desarrollo de la industria extractiva minera, la cual se desarrolla actualmente con gran presencia en el territorio nacional y tiene una cartera de proyectos mineros importante para los próximos años, este estudio propone una metodología para realizar la identificación de macizos rocosos alterados, que serán evaluados desde el punto de vista de la estabilidad física y tendrán sus controles de diseño.

Actualmente el Batolito de Andahuaylas – Yauri sigue siendo ampliamente explotado y explorado, con el objetivo de encontrar nuevos depósitos y los depósitos que ya están descubiertos siguen trabajando campañas de perforación con el fin de aumentar sus reservas.

El cinturón de Andahuaylas – Yauri cubre un área aproximada de 25 000 Km cuadrados, localizado a una distancia aproximada de 300 Km de la fosa peruano – chilena. Esta zona tiene una de las más potentes cortezas sílicas del erógeno andino y se encuadra en la zona de transición entre un régimen de subducción normal entre el sur del Perú y el norte de Chile y una zona de subducción plana en el centro y norte del Perú. Está localizada inmediatamente hacia el sueste de la deflexión de Abancay. La región abarca parte de la depresión intermontaña entre el este y oeste de las Cordilleras y la extremidad norte del Altiplano, la parte occidental del cinturón está caracterizado por una abrupta topografía montañosa donde los rangos de los picos nevados están por encima de los 4500 m y son cortados por profundos cañones de 2000 m. esos cañones constituyen el principal sistema de drenaje de la región e incluye los ríos de Santo Tomas, Urubamba, Apurímac, Vilcanota, Mollebamba y Antabamba (Rivera et al., 2010).

El potencial minero del cinturón de Andahuaylas – Yauri es conocido desde hace muchos años, después de

mucho queda clara la idea que toda esta mineralización se encuentra relacionado estrechamente con el magmatismo del Eoceno medio al Oligoceno temprano (aprox 48 a 32 Ma) que dio origen al batolito de Andahuaylas – Yauri, en donde se emplazaron las asociaciones de skarn, pórfidos y vetas. En tal sentido varios clústers han sido identificados, teniendo entre los principales: Tintaya, Kananga, Las Bambas, Cotabambas, Morosayhuas entre otros yacimientos.

Estos sistemas porfiríticos tienen una característica esencial que los hace económicamente muy importantes y es la presencia de Au dentro de sus elementos económicos y suelen clasificarse como Au-Cu-Mo y Cu-Au-Mo.

Metalogenéticamente el Batolito de Andahuaylas se encuentra dentro del dominio del arco principal y dentro del dominio de la franja XV denominada: Pórfidos – skarn de Cu – Mo (Au, Zn) y depósitos de Au – Cu – Fe relacionados a intrusivos del Eoceno – Oligoceno (Rivera et al., 2010).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la industria minera en donde los procesos extractivos de minerales están relacionados directamente a la construcción de estructuras en rocas tales como tajos y socavones; como parte de este proceso se requiere la construcción de taludes en macizos rocosos, los cuales tiene diferentes características geológicas, geomecánicas, estructurales e hidrogeológicas que definen el comportamiento de estabilidad física en estas estructuras.

La caracterización geomecánica de los macizos rocoso es muy importante para una adecuada evaluación de estabilidad física de los taludes, es conocido que en un mismo tipo de roca se puede observar una variabilidad en la calidad de macizo rocoso, sin embargo, adoptar un adecuado criterio para la definición de los parámetros de resistencia de macizos rocosos alterados o débiles, aporta en la evaluación de estabilidad física de este tipo de materiales.

El planteamiento del problema a desarrollar en el presente estudio es el siguiente:

¿Cómo realizar una correcta caracterización geomecánica y definición de parámetros de resistencia de macizos rocosos alterados o débiles?

¿Cómo obtener resultados de análisis de estabilidad que representen inestabilidades en macizos rocosos alterados o débiles y proponer parámetros de diseño que cumplan con los criterios de aceptabilidad?

1.2. OBJETIVOS

Objetivo General

- Plantear un criterio, metodología y clasificación de macizos rocosos alterados o débiles para la

aplicación en la estabilidad de taludes y que cumplan con criterios de aceptabilidad.

Objetivos Específicos

- Caracterizar geomecánicamente macizos rocosos alterados.
- Definir unidades geotécnicas y parámetros geomecánicos.
- Analizar la estabilidad de taludes en macizos rocosos alterados o débiles según geometrías establecidas.
- Identificar zonas con potencial inestabilidad y proponer parámetros geométricos de diseño para cumplir los criterios de aceptabilidad.

2. MARCO TEÓRICO [rango 1]

Actualmente en el ámbito minero-geológico surge la necesidad de evaluar el comportamiento de suelo y roca, la geotecnia engloba los principios y técnicas ingenieriles y geológicos para la valoración del terreno y su respuesta mecánica ante los esfuerzos in situ e inducidos, que nos permiten entender el área de trabajo y así emitir propuestas referentes a medidas de control y seguridad como una buena productividad en los procesos (Alvarado, 2020).

La clasificación geomecánica de macizos rocosos RMR de Bieniawski, fue propuesto en el año 1973 a partir de la estimación de ocho parámetros iniciales y modificada en los años posteriores 1976, 1979, 1984 y 1989. La versión de 1976 corresponde al RMR básico la cual es equivalente al GSI, posteriormente en la versión de 1989 las valoraciones incrementaron en un valor total de 5 para el RMR. Otra clasificación geomecánica muy importante es el Sistema Q, propuesto por Barton en 1974.

El término "rocas débiles" en la clasificación de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) comprende rocas con resistencias intactas que van de extremadamente débiles (R0) a débiles (R2), con resistencias a la compresión uniaxial (UCS) equivalentes que van de 250 kPa a 25 MPa, respectivamente (Stacey, 2018).

Los macizos rocosos alterados que son el equivalente a rocas débiles, están presentes en los yacimientos mineros, las cuales forman parte de los materiales que constituyen características de baja resistencia en los taludes y son materiales en donde se desarrollan potenciales mecanismos de falla o deslizamientos.

Las fallas en los taludes de las paredes de los tajos excavados en rocas débiles pueden mostrar comportamientos que van desde los asociados a los suelos rígidos hasta las fallas parcialmente controladas por estructuras geológicas discretas. Para este proyecto de tajos profundos (LOP), el término "rocas débiles" se utiliza para reconocer tanto la resistencia de las rocas

débiles como las propiedades similares a las del suelo (Stacey, 2018).

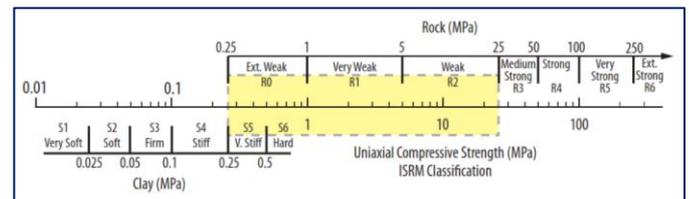


Figura 1. Rango de resistencias a la compresión uniaxial típicamente asociadas a la geología de "roca débil" (Brown, 1981).

Los análisis de estabilidad en taludes tienen el objetivo de validar los diseños geométricos estables, en función de las condiciones requeridas que pueden ser el tiempo (corto, mediano o largo plazo), la relación seguridad vs costo operacional u otros propios de la zona de estudio. Estos análisis deben de considerar los factores internos y externos presentes para lograr un factor de seguridad aceptable.

La geología de la región está dominada por un conjunto de plutones Cenozoicos denominados Batolito Andahuaylas – Yauri que intruye una secuencia sedimentaria marina mesozoica constituida por las rocas clásticas del Grupo Yura (Jurásico) y los horizontes carbonatados de la Fm. Ferrobamba (Cretácico), y en menor proporción las rocas sedimentarias predominantemente lacustres de las formaciones Quilque y Chilca (Paleoceno – Eoceno). Hacia el norte la geología se encuentra dominada principalmente por varias secuencias volcánicas y vulcano – sedimentarias (Fm. Anta; Eoceno medio – Oligoceno inferior) y sedimentarias continentales incluyendo la serie de las "capas rojas" del Grupo San Jeronimo (Rivero et al., 2010).

2.1. CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR BIENIAWSKI

La clasificación geomecánica RMR 76 tiene en su estructura 05 criterios de análisis, que abarca el ámbito de la matriz rocosa y el macizo rocoso, para este último se divide en evaluar el grado de fracturamiento (RQD y espaciamiento), la condición de discontinuidades y la presencia de aguas, con lo cual se calcula el RMR mediante la ecuación.

$$RMR = V(UCS) + V(RQD) + V(S) + V(CD) + V(CA)$$

Cada puntaje corresponde a los parámetros establecidos:

- V(UCS) Resistencia de la roca
- V(RQD) Rock quality designation
- V(S) Espaciamiento de discontinuidades
- V(CD) Condición de discontinuidades
- V(CA) Condiciones hidrológicas

Con estos criterios que se revisaran a continuación, se realiza la valoración de cada parámetro siguiendo la tabla de clasificación propuesta por Bieniawski en su versión de 1976.

Tabla 1. Clasificación geomecánica RMR 76 (Bieniawski, 1976).

Resistencia de la roca inalterada	Índice de carga puntual	>8 Mpa	4 - 8 Mpa	2 - 4 Mpa	1 - 2 Mpa	Para estos rangos bajos es preferible utilizar las pruebas de UCS		
	Resistencia a la compresión uniaxial	>200 Mpa	100 - 200 Mpa	50 - 100 Mpa	25 - 50Mpa	10 - 25 Mpa	3 - 10 Mpa	1 - 3 Mpa
Valoración		15	12	7	4	2	1	0
Cantidad de testigo perforado (RQD)	90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%			
	Valoración	20	17	13	8	3		
Espaciamiento de fracturas	>3 m	1 - 3 m	0.3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 mm			
	Valoración	30	25	20	10	5		
Condición de juntas	Superficie muy rugosas Sin continuidad Sin separación Paredes de roca dura	Superficies algo rugosas Separación < 1mm Paredes de roca dura	Superficies algo rugosas Separación < 1mm Paredes de roca	Superficies pulidas o relleno < 5 mm o juntas abiertas 1 - 5 mm	Relleno Blando > 5 mm o juntas abiertas > 5 mm Fisuras continuas			
	Valoración	25	20	12	6	0		
Agua Subterránea	Cantidad de Infiltración, por 10 m de longitud de tunel	Ninguna		< 25 lt/min	25 - 125 lt/min	> 125 lt/min		
	Ratio: presión del agua en las juntas / esfuerzo principal mayor	0		0.0 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
Condiciones generales	Totalmente seco		Solo húmedo	Ligera presión de agua	Serios Problemas de agua			
	Valoración	10		7	4	0		

2.2.1. RESISTENCIA DE ROCA INALTERADA

La resistencia a la compresión de la roca puede ser estimada a partir de observaciones de campo o calculada a partir de ensayos in-situ o de laboratorio (esclerómetro de Schmidt, carga puntual o compresión uniaxial).

La resistencia de roca inalterada se obtiene principalmente del ensayo de mecánica de rocas de compresión uniaxial, en donde se determina la resistencia a la compresión de una muestra de roca cilíndrica, en el caso del presente estudio se realizaron ensayos en porciones del sondaje, con un diámetro determinado e igual para toda muestra, la cual fue sometida a una carga axial sin ninguna carga de confinamiento aplicada de forma continua y gradualmente hasta lograr la rotura o falla.

Este parámetro también puede ser obtenido con la correlación experimental de los ensayos de carga puntual o point load test (PLT), este ensayo requiere ser correlacionado con el ensayo de compresión uniaxial, a través de realizar ambos ensayos en fragmentos de rocas continuos, que pertenezcan a la misma corrida y al mismo tipo de roca.

El ensayo de carga puntual es muy práctico y de sencilla aplicación en campo, por lo cual obtener una base de datos con una mayor cantidad muestras ensayadas es más factible que los ensayos de compresión uniaxial.

2.2.2. RQD

Corresponde a la sumatoria de todos los bloques con un porcentaje de longitud de testigos de más de 10 cm de longitud, sin tomar en cuenta las fracturas de origen mecánico debido a los procesos de perforación. Esta sumatoria es dividida por la longitud recuperada del intervalo.

El parámetro RQD fue desarrollado y propuesto por Deere et. al (1964), en donde el valor de RQD bajo será indicativo de una roca muy fracturada, en tanto un RQD de 100% significa que todas las piezas de roca son más grandes que 10 cm.

La siguiente ecuación expresa el cálculo de RQD.

$$RQD = \frac{\sum (\text{Longitud de las piezas} > 10 \text{ cm.})}{\text{Longitud total de la "corrida"}} \times 100\%$$

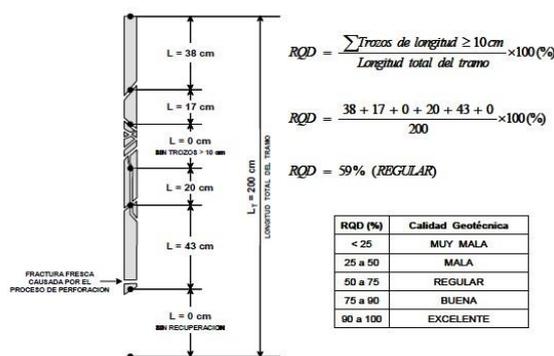


Figura 2. Esquema de medición de parámetro RQD (Alvarado, 2020).

2.2.3. ESPACIAMIENTO DE FRACTURAS

La presencia de discontinuidades naturales en un mismo intervalo o corrida puede ser cuantificada linealmente como el número de discontinuidades por metro. Por otro lado, el espaciamento corresponde a la distancia perpendicular entre discontinuidades, por lo tanto, el espaciamento es calculado de modo inverso a la frecuencia.

El espaciamento definitivamente controla el tamaño de los bloques de roca intacta. Un macizo con múltiples discontinuidades poco espaciadas tiende a tener baja cohesión, en tanto cuando existen pocas discontinuidades y espaciamentos amplios, los bloques de roca podrán mantenerse inter-ligados.



Figura 3. Utilización de una regla de longitud conocida para medir la frecuencia o el espaciamiento aparente de una familia de discontinuidades (Maldonado, 2007).

2.2.4. CONDICIÓN DE DISCONTINUIDAD

La estabilidad de los taludes es a menudo significativamente influenciada por el arreglo de las discontinuidades, debido a que ellas se comportan como planos de debilidad, tal que aún en las rocas más fuertes la ruptura tiende a ocurrir preferentemente a lo largo de estas superficies. Debido a este hecho, es fundamental registrar las características mecánicas de las discontinuidades, como son: persistencia, abertura, intemperismo, rugosidad y el tipo de material de relleno.

Tabla 2. Condición de discontinuidades (Bieniawski, 1976).

Persistencia	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
Persistencia Logueo	Abertura (0 - 5 mm)	Abertura (5 - 10 mm)	Abertura (10 - 50 mm)	Abertura (50 - 100 mm)	Abertura (>100 mm)
Valoración	5	4	2	1	0
Abertura (mm)	Nada	< 0.1 mm	0.1 - 1.0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
Valoración	5	4	3	1	0
Rugosidad	Muy Rugosa	Rugosa	Levemente Rugosa	Lisa	Pulida
Valoración	5.0	4.0	2.0	1.0	0.0
Tipo de Relleno	Nada	Resistente > 5 mm	Resistente < 5 mm	Blando > 5 mm	Blando < 5 mm
Valoración	5.0	4.0	2.0	2.0	0.0
Intemperización	Inalterada	Levemente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta
Valoración	5.0	4.0	3.0	1.0	0.0
Total Valoración	25.0	20.0	12.0	6.0	0.0

2.2.4.1. Persistencia

Las discontinuidades son superficies finitas, que puede terminar en roca intacta, en otra discontinuidad o prolongarse más allá de la ventana o área de muestreo. De esto se deduce que la persistencia depende de la escala de observación. Por otro lado, es posible que en un macizo rocoso las familias de discontinuidades posean diferente persistencia, lo cual puede relacionarse a diferencias cronológicas, a la respuesta mecánica diferenciada de la roca o a la sobre posición de diferentes mecanismos de formación.

La persistencia es la extensión longitudinal de las discontinuidades, para describir esta extensión en la ventana de muestreo, se asume que la longitud de los trazos observados representa la extensión de las discontinuidades. Durante el muestreo de ventana es conveniente dar mayor atención a las discontinuidades

con una longitud de trazo igual o mayor que las dimensiones de la ventana, debido a que estas discontinuidades pueden tener un mayor impacto en la estabilidad de los taludes que aquellas con menor persistencia.

2.2.4.2. Abertura

Es la distancia perpendicular que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad abierta, en la cual solo existe aire o agua como relleno. La apertura es por tanto distinguida del espesor de una discontinuidad rellena. Discontinuidades que han sido rellenas (i.e. con arcilla) también son consideradas en esta categoría, siempre que el material haya sido lavado fuera de la discontinuidad. La apertura es usualmente medida en mm.

2.2.4.3. Rugosidad

La rugosidad de la superficie de una discontinuidad es a menudo una importante componente de la resistencia al corte, especialmente donde la discontinuidad ocurre sin desplazamiento y cerrada. La rugosidad tiende a ser menos importante cuando existe relleno o ha sufrido desplazamiento previo.

La forma irregular o rugosa de la superficie de una discontinuidad es interpretada como la combinación de una ondulación mayor y una irregularidad menor. Así, para describir la rugosidad se combinan los términos utilizados para las irregularidades mayores (escalonada, ondulada y plana) con los términos empleados para las irregularidades menores (rugoso, suave y estriado).

El principal propósito de describir la rugosidad de las paredes de las discontinuidades es el de facilitar la estimación de la resistencia al cizalle de estas, en particular en el caso de las estructuras sin relleno. Este parámetro permite estimar el grado de aspereza natural presente en las discontinuidades de la roca. Se determina en dos escalas la mayor a escala del banco o galería observada y la otra a escala menor centimétrica.

Escala Mayor o banco: La rugosidad a escala mayor, permite estimar y describir la rugosidad de las diferentes estructuras a nivel de un banco minero o de varios bancos utilizando los perfiles de rugosidad del ISRM (1981).

Escala Menor JRC: Este parámetro permite estimar el grado de aspereza natural presente en las discontinuidades de la roca a escala menor 10 cm, siendo un importante parámetro para la caracterización de la condición de las discontinuidades. El JRC ha sido definido por Barton (1977) para el cálculo del coeficiente de rozamiento interno de la roca.

2.2.4.4. Tipo de Relleno

El relleno es el material que separa las paredes adyacentes de una discontinuidad, este relleno desde el punto geológico puede ser calcita, clorita, arcilla, panizo, brecha, entre otros. En tanto, la distancia perpendicular entre las paredes adyacentes es denominada de espesor del relleno.

Los materiales de relleno modifican las propiedades de resistencia, deformabilidad y conductividad de las discontinuidades. Tal variación depende de las características físicas del relleno como: mineralogía, tamaño de partícula, contenido de agua, sobre – consolidación, desplazamientos previos, espesor del relleno, etc.

El registro del material de relleno se clasifica en general por relleno duro o suave, en combinación con su espesor, mayor o menor de 5 mm. La competencia del material de relleno es importante para aproximar valores de resistencia al corte.

2.2.4.5. Intemperismo

El intemperismo de las paredes de las discontinuidades se refiere al grado de alteración de éstas con respecto a la matriz de la roca. Es importante señalar que este parámetro se refiere a la variación comparativa en las propiedades resistentes del macizo rocoso.

El intemperismo se produce por: las aberturas de las discontinuidades naturales, la formación de nuevas discontinuidades por quiebre de la roca y la abertura a lo largo de las imperfecciones en los granos o minerales constituyentes de la roca. El intemperismo químico resulta de la descomposición de los minerales constituyentes de la roca, siendo distinguible por la decoloración superficial de los afloramientos. La disolución es una parte del intemperismo químico, y es particularmente importante en rocas constituidas por minerales carbonatados o salinos.

El grado de intemperismo puede ser clasificado en función a las observaciones del grado de desintegración o descomposición en los bloques de roca, así como la decoloración observada en las superficies de las discontinuidades

2.2.5. PRESENCIA DE AGUA

La existencia de agua en el macizo rocoso es producida principalmente por el flujo de agua a través de las discontinuidades (conductividad hidráulica secundaria). Por tanto, el contenido de agua en las discontinuidades debe ser registrada, debido a su efecto adverso en la estabilidad de los taludes (tensión normal efectiva). Para la descripción del contenido de agua tanto de discontinuidades sin relleno como para aquellas con relleno, se puede utilizar la tabla propuesta por la ISRM (1981).

Tabla 3. Contenido de agua en las discontinuidades (Brown, 1981).

Discontinuidades sin relleno		
Grado	Descripción de la discontinuidad	Flujo de agua
1	Muy estrecha y seca	No parece posible
2	Seca	Sin evidencias de flujo
3	Seca	Evidencia de flujo
4	Húmeda	Sin agua libre presente
5	Tiene infiltración	Gotas de agua ocasionales, no continuas
6	Con flujo continuo de agua	Estimar el flujo en litros/min.
Discontinuidades con relleno		
Grado	Descripción del material de relleno	Flujo de agua
1	Fuertemente consolidados y secos	Existencia de flujo significativos es improbable, debido a muy baja permeabilidad
2	Húmedos	No hay agua libre presente
3	Mojados	Existen gotas de agua ocasionales
4	Señales de desgaste	Ocurre flujo continuo de agua (estimar litros/min.)
5	Muestran desgaste localmente	Flujo de agua considerable a lo largo de canales de desgaste (estimar litros/min.), describir la presión (baja, media, alta)
6	Completamente desgastados	Se experimenta una muy alta presión de agua, especialmente a primera vista (estimar el flujo y la presión).

2.2. CLASIFICACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS ALTERADOS

Para la clasificación de macizos rocosos alterados se utiliza el criterio de estimación de la resistencia de material propuesto por Brown en 1981 en su publicación en el ISRM (1981).

Este criterio permite asignar rangos de resistencia al material rocoso, así como definir categorías. Para efectuar una estimación de la resistencia a la compresión simple aplicando el criterio del ISRM se debe utilizar un cortaplumas y martillo de geólogo de acuerdo a la tabla siguiente denominada “Criterios para la Estimación de la Resistencia del Material”.

La asignación de modo cualitativo un rango de resistencia es muy importante porque permite diferenciar a los macizos rocoso alterados, en este tipo de materiales son aquellos en donde se pueden desarrollar las potenciales inestabilidades.

El grado R0 está definido como un material extremadamente débil, en la mecánica de rocas se asigna aun material de relleno de falla (panizo).

Los grados de R1 y R2 corresponden a macizos rocosos alterados, este tipo de materiales son desmenuzados y deformados por golpes firmes del martillo de geólogo.

Es importante el reconocimiento de estos materiales, los cuales permitirán dentro de la clasificación RMR diferenciar los rangos apropiados para los macizos rocosos alterados.

El grado R3 corresponde a un macizo rocoso regular, en donde con un golpe firme del martillo de geólogo se puede generar fracturamiento.

En el criterio de resistencia estimada se tiene que desde el R1 al R3, se considera que los macizos rocosos tienen una resistencia de 1 a 50 MPa, para este tipo materiales no es factible la aplicación ensayos de mecánica de roca con éxito, debido a que las roturas obtenidas en estos ensayos se dan por estructuras, invalidando el ensayo que busca obtener la resistencia de la matriz rocosa.

Para los grados de R4 a R6, se consideran macizos rocosos competentes, en donde los ensayos de mecánica de rocas tienen una mejor respuesta al obtener la resistencia de roca intacta.

Tabla 4. Criterios para la estimación de la resistencia del material (Brown, 1981).

Grado	Término	Identificación en campo	Ejemplos	Schmidt	Is (Mpa)	UCS (Mpa)
R0	Extremadamente débil	Puede ser marcada por la uña	Panizo de las fallas	*	**	0.25-1
R1	Muy débil	Se desmenuza con golpes firmes, con la punta del martillo de geólogo y puede ser arañada por una navaja	Roca alterada e intemperizada	*	**	1 - 5
R2	Débil	Puede ser raspada con dificultad por una navaja, golpeando firmemente con la punta del martillo de geólogo se logra una marca poca profunda	Tiza, rocas salinas y potasio	< 20	**	5 - 25
R3	Medianamente fuerte	No puede ser raspada por una navaja, pero puede ser fracturada con un golpe firme del martillo de geólogo	Carbón, concreto, esquistos, arcillas, pizarras	20 - 30	1 - 2	25-50
R4	Fuerte	Se requiere mas de un golpe del martillo de geólogo para ser fracturada	Caliza, mármol, arenisca, esquistos	30 - 45	2 - 4	50-100
R5	Muy fuerte	Se requiere muchos golpes con el martillo de geólogo para ser fracturada	Anfibolita, arenisca, basalto, gabro, gneis, granodiorita, peridotitas, riolita, tufa	45 - 60	4 - 10	100-250
R6	Extremadamente fuerte	Puede ser apenas arañada con el martillo de geólogo	Basalto fresco, chert, diabasa, gneis, granito, cuarcita	> 60	> 10	> 250

2.3. ESTABILIDAD DE TALUDES EN TAJOS ABIERTOS

Los análisis de estabilidad permiten diseñar la geometría de los taludes, mediante el cálculo de su factor de seguridad y definir el tipo de medidas correctoras y estabilizadoras que deben de ser aplicadas en caso de roturas potenciales identificadas. Es necesario el conocimiento geológico y geomecánico de los materiales que forman el talud, con los cuales se evaluarán los modelos geotécnicos y los posibles mecanismos de rotura que pueden tener lugar juntamente con los factores que influyen, condicionan y desencadenan las inestabilidades.

El diseño de taludes es uno de los aspectos más importantes de la ingeniería geológica, pues está presente en la mayoría de las actividades constructivas o extractivas.

La metodología seguida en los estudios de estabilidad de taludes parte del conocimiento geológico, estructural, hidrogeológico y geomecánico del macizo o suelo entre otros, que junto con el análisis de los factores externos que actúan sobre el terreno, definen el comportamiento de los materiales y sus mecanismos de deformación - rotura.

2.3.1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD

La estabilidad de un talud está determinada por factores geométricos (altura e inclinación), factores geológicos estructurales (que condicionan la presencia de planos y zonas de debilidad y anisotropía en el talud), factores hidrogeológicos (presencia de agua), factores geomecánicos relacionados con el comportamiento mecánico de los macizos rocosos – suelos (resistencia y deformabilidad), entre otros como vibraciones y daño de los taludes por voladura y sismicidad.

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de una o varias superficies, y que sea cinemáticamente posible en movimiento de un cierto volumen de masa de suelo o roca.

Los factores geológicos - estructurales, hidrogeológicos y geomecánicos se consideran factores condicionantes, y son intrínsecos a los materiales naturales. En los suelos, la litología, estratigrafía y las condiciones hidrogeológicas determinan las propiedades resistentes y el comportamiento del talud. En el caso de macizos rocosos competentes el principal factor condicionante es la condición de las discontinuidades, la disposición y frecuencia de las superficies de discontinuidad y el grado de fracturamiento.

3. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente estudio es práctica y analítica, para lo cual se utilizará la recolección de la data geomecánica de testigos de roca de perforaciones en campo, con esta información se genera una base de datos, para su posterior análisis.

La evaluación de los parámetros geomecánicos de caracterización y resistencia, consiste en realizar los análisis estadísticos de estas variables, con la finalidad de analizar su distribución (mínimos y máximos), la media, la mediana, la desviación estándar y los cuartiles.

Para el desarrollo de este análisis se realizaron gráficos de porcentajes, box plot, cuadros estadísticos e histogramas de frecuencia. Este análisis es muy importante porque permitirán conocer el comportamiento estadístico de las variables y brindarán soporte para la definición de las unidades geotécnicas.

Con esta información se realizaron los análisis de estabilidad utilizando los métodos numéricos de diferencia finita generalizada de varias alternativas de parámetros geomecánicos, realizando comparaciones y evaluaciones de los resultados de factor de seguridad obtenidos.

3.1. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El caso de estudio buscar generar un criterio de clasificación de los macizos rocosos alterados mediante la aplicación de la estadística descriptiva para las variables de RMR y resistencia estimada, los cuales utilizan los datos proporcionados del logeo geomecánico con los datos de las variables de diseño y condiciones de agua; así se obtendrán los factores de seguridad que cumplan con los criterios de aceptabilidad.

Los pasos del diseño de la investigación se detallan a continuación:

- Revisión de literatura y estudio anteriores realizados.
 - Análisis preparatorio y exploratorio de la base de datos del logueo geomecánico.
 - Análisis de clasificación geomecánica RMR 76.
 - Análisis de ubicación espacial de los parámetros geomecánicos.
 - Análisis estadístico de los parámetros geomecánicos.
 - Análisis de distribución de las variables con histogramas.
 - Definición de unidades geotécnicas.
 - Construcción de modelos geotécnicos con escenarios de diseño y condiciones hidrogeológicas.
 - Análisis de estabilidad de macizos rocosos alterados a través de las simulaciones por los métodos numéricos de diferencias finitas, con lo cual se determinará el aporte de la discretización empleando la resistencia estimada para el análisis de unidades geotécnicas vs la simulación directa de RMR.
- El procedimiento a seguir se muestra sintetizado para el desarrollo del caso de estudio propuesto de acuerdo con los objetivos planteados.

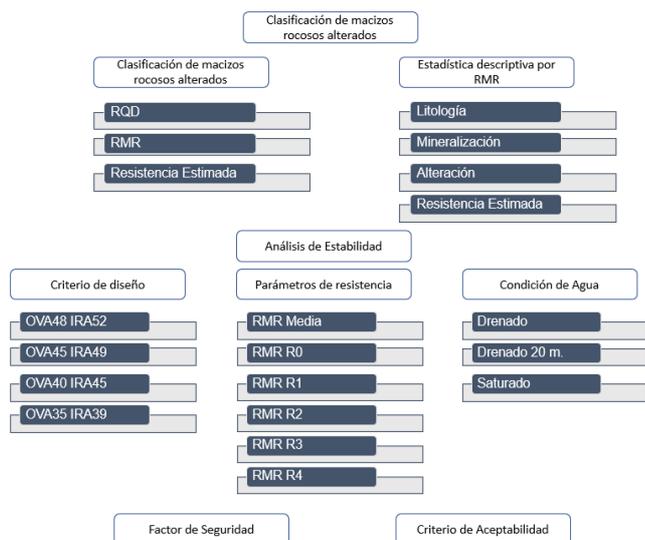


Figura 4. Esquema de la metodología utilizada.

3.2. VARIABLES UTILIZADAS

Las variables utilizadas para el análisis de estabilidad de macizos rocosos alterados en el presente estudio son el RMR, carga puntual, compresión uniaxial, tracción indirecta, corte directo, densidad, litología, mineralización, alteraciones y resistencia estimada.

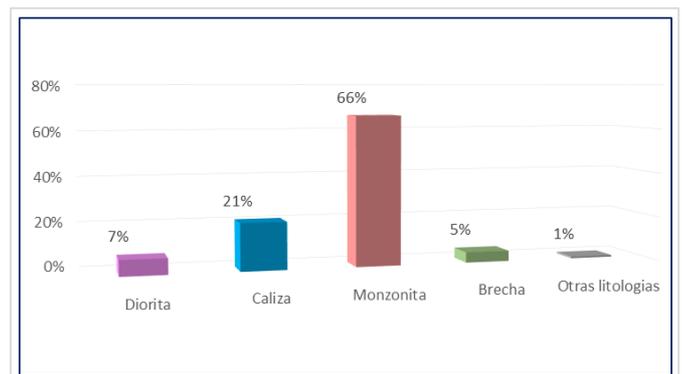
Se analizó primero la cantidad porcentual de cada litología, mineralización, alteración y resistencia estimada en la base de datos, luego se analizó los rangos de distribución de las variables RMR, carga puntual, compresión uniaxial, tracción indirecta y corte directo; finalmente con la variable RMR se realizó los

histogramas de frecuencia cruzando litología, mineralización, alteración y la resistencia estimada.

3.2.1. LITOLOGIA

En el presente estudio se realizará la caracterización geomecánica y distribución estadísticas de cuatro unidades litológicas, las cuales tienen mayor representación en la base de datos y también corresponde a los tipos de rocas asociadas a los yacimientos mineros en la franja metalogénica de Andahuaylas – Yauri.

Gráfico 1. Porcentaje de población unidades litológicas.



Como se puede observar en la gráfica anterior, el tipo de roca monzonita tiene una presencia de 66% la cual corresponde a los eventos de intrusión que favorecieron a la formación de los yacimientos económicos en la zona de estudio.

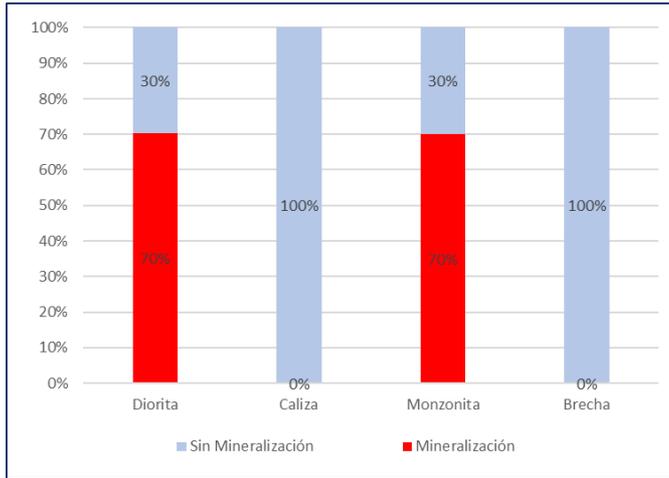
Seguidamente se tiene la roca sedimentaria caliza con una presencia de 21%, que en gran parte corresponde a la formación Ferrobamba, la cual está asociada a desarrollar yacimientos del tipo skarn en la zona de estudio.

Finalmente tenemos a las rocas intrusiva diorita y brecha con 7% y 5% respectivamente, estas rocas están asociadas a los yacimientos de la zona de estudio que tienen origen propias de un evento intrusivo y también a los esfuerzos friccionaste de alta presión y temperatura como es caso para la formación de brechas.

3.2.2. MINERALIZACIÓN

Para revisar el comportamiento geomecánico RMR de acuerdo a la mineralización, en donde las rocas que contiene mineral deben presentar un menor valor de clasificación geomecánica por estar asociados a grandes esfuerzos de presión y temperatura, se muestra el porcentaje de mineral presente en cada tipo de las unidades litológicas del presente estudio.

Gráfico 2. Contenido de mineral por unidades litológicas.



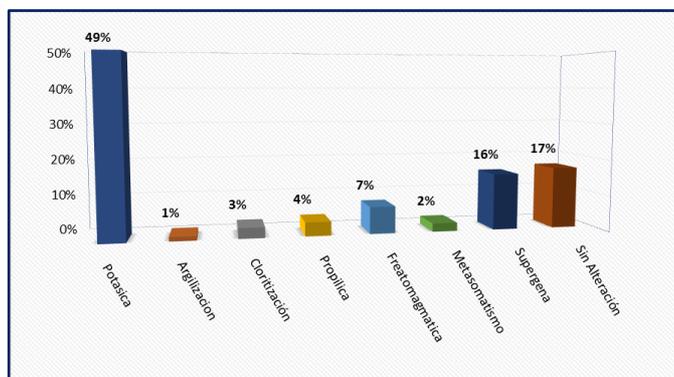
Como se puede observar en la gráfica anterior, las unidades litológicas que cuentan con mineralización son la diorita y la monzonita; la caliza y la brecha son rocas que no estériles.

3.2.3. ALTERACIONES

La base de datos cuenta con información de alteraciones asociadas a los ensambles mineralógicos, con esta información también se realizará la revisión del comportamiento geomecánico RMR de cada unidad litológica por su tipo de alteración.

En la gráfica se puede observar que las unidades litológicas del presente estudio presentan un mayor porcentaje de alteración potásica, la cual está directamente asociada a la mineralización y se da en las rocas intrusivas como son la diorita y monzonita, por otro lado, la alteración supérgena muestra un porcentaje de 16% a diferencia de la alteración argílica, las cuales se espera que tengan un comportamiento geomecánico de baja calidad.

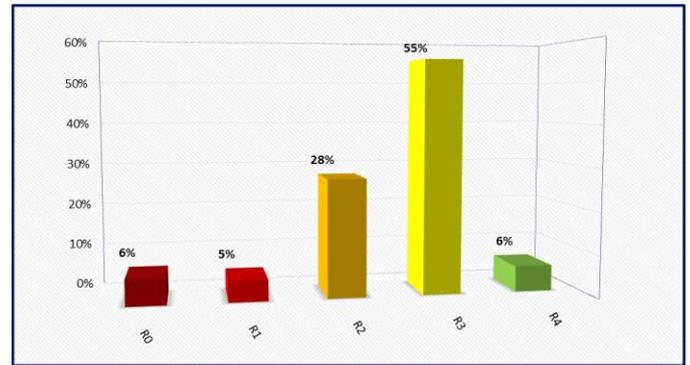
Gráfico 3. Porcentaje de población por alteraciones mineralógicas.



3.2.4. RESISTENCIA ESTIMADA

La base de datos cuenta con información de resistencia estimada del logueo geomecánico, con esta información se realizará la revisión del comportamiento geomecánico RMR de cada unidad litológica.

Gráfico 4. Porcentaje de población por resistencia estimada.



En la gráfica se puede observar que la resistencia estimada R3 presenta un mayor porcentaje de la población con un 55%, seguido de R2 con un 28%, lo que nos permite indicar que la base de datos corresponde a un macizo rocoso alterado y regular.

3.3. INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

La data de campo que soporta los análisis del presente estudio pertenece a investigaciones geotécnicas realizados a través de sondajes diamantinos, en donde se extrae los núcleos de macizo rocoso, que son caracterizados y también se realizan ensayos de mecánica de rocas para la obtención de parámetros de resistencia.

Es recomendable siempre realizar logueo geomecánico a todos los sondajes diamantinos, cuales fuera su objetivo, esto permitirá contar con información de clasificación geomecánica y resistencia de los materiales, que es requerido por los estudios técnicos de los proyectos u operaciones mineras.

En sondajes con objetivos geotécnicos es fundamental realizar perforaciones orientadas de tubo partido con lo cual se obtendrá la dirección espacial de las discontinuidades y también de las estructuras mayores y principales (fallas), estos trabajos deben ser complementados con ensayos de testificación geofísica (televiewer) con lo cual se podrá validar la data y realizar los controles de calidad.

La caracterización geomecánica utilizada es el RMR básico del año 1976 de Bieniawski, esta clasificación es muy utilizada en la industria minera e importante debido a que sienta los criterios técnicos en la clasificación de macizos rocosos, que luego servirá para organizar las bases de datos y finalmente los análisis geotécnicos.

Las investigaciones de campo se dividen en los trabajos de campo y los trabajos de laboratorio, a continuación, se describe los trabajos realizados.

Tabla 7. Cantidad de ensayos de compresión uniaxial.

Tipo de Rotura	Cantidad de Ensayos
Matriz	553
Estructura	177
Matriz - Estructura	1
Total:	731

Tabla 8. Cantidad de ensayos de tracción indirecta.

Tipo de Rotura	Cantidad de Ensayos
Matriz	547
Estructura	66
Matriz - Estructura	1
Total:	614

Para los ensayos de corte directo en discontinuidades se tiene 99 ensayos, en donde se reportaron los parámetros de resistencia de cohesión y fricción.

4. ESTABILIDAD DE TALUDES EN MACIZOS ROCOSOS ALTERADOS

Los macizos rocosos alterados se encuentran en los yacimientos mineros del batolito de Andahuaylas - Yauri, sin embargo, es difícil diferenciarlos aplicando solo la clasificación geomecánica del RMR, para lo cual el estado de la practica indica trabajar con la mineralización y las alteraciones. Adicional a ello, el presente estudio propone incluir el criterio de resistencia estimada del ISRM 1981, para la diferenciación de este tipo de macizos.

La aplicación actual del sistema de clasificación de macizos rocosos (RMR) - Bieniawski y su posterior introducción en el criterio de resistencia de Hoek-Brown arroja parámetros de resistencia bajos que no representan los taludes estables excavados dentro de macizos rocosos débiles, como se observa en muchas operaciones mineras y cortes de carretera (Castro, 2013).

En el presente capitulo se realizará la revisión de las propiedades del macizo rocoso de las variables descritas en la seccion 3.2, con el uso de las herramientas de la geoestadística descriptiva se analizará el comportamiento de la distribución del RMR, para la diferenciación de los macizos rocosos alterados y su definición de unidades geotécnicas.

Finalmente se realizará los análisis de estabilidad por los modelos numéricos de diferencias finitas con el software computacional FLAC – Slope v8, para 04 geometrías de diseño, 06 grupos de parámetros de resistencia y 03 condiciones de agua; con lo cual se obtendrán los factores de seguridad.

4.1. ANALISIS ESTADISTICO DE PROPIEDADES GEOMECANICAS

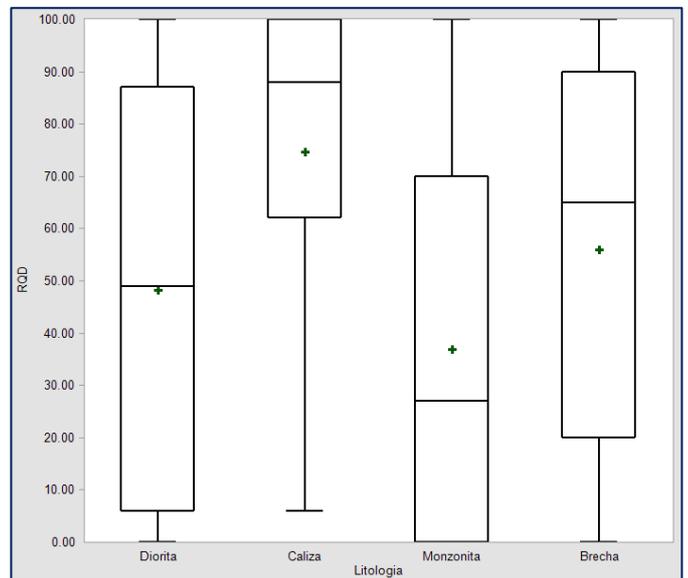
4.1.1. BOX PLOT Y REPORTE ESTADISTICO

A continuación, se muestra la distribución estadística de los parámetros geomecánicos utilizando las gráficas de box plot y el resumen de la estadística descriptiva para el RQD, RMR, ensayos de carga puntual y ensayos de compresión uniaxial, por cada unidad litológica.

Este análisis nos permitirá ver los rangos mínimos, máximos, la media, la mediana y la desviación estándar de la población de cada parámetro geomecánico filtrado por cada tipo litológico.

Para los casos de las variables de ensayos de mecánica de rocas como son los ensayos de carga puntual, compresión uniaxial y tracción indirecta se filtró también por el tipo de rotura.

Gráfico 5. Box plot de RQD por unidad litológica.



Se observa un rango de distribución muy amplio de la variable RQD para todas las litologías y un comportamiento estadístico diferenciado entre ellas. La diorita, monzonita y brecha tienen unos cuartiles muy amplios a diferencia de la caliza, sin embargo, la diorita tiene una mejor concordancia de la media y la mediana a diferencias de las otras litologías.

Tabla 9. Estadística de RQD por unidad litológica.

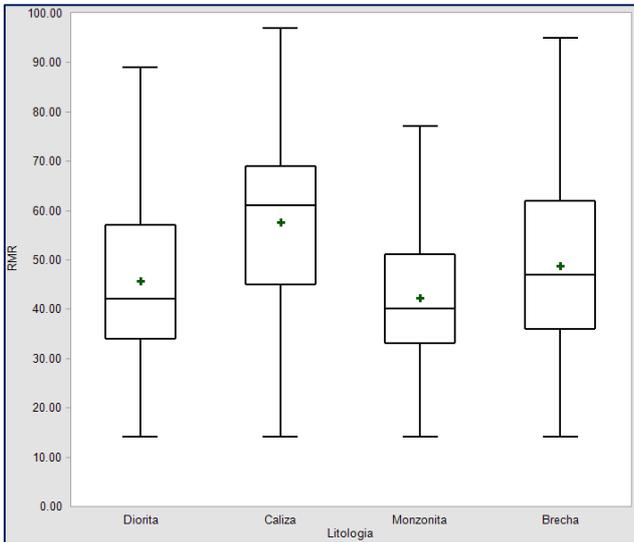
Litología	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
Diorita	0	100	48.2	6	49	87	38.2
Caliza	0	100	74.7	62	88	100	30.9
Monzonita	0	100	36.8	0	27	70	36.2
Brecha	0	100	55.9	20	65	90	36.8

El reporte estadístico muestra que la litología monzonita presenta un mayor grado de fracturamiento en comparación con la diorita y la brecha que tiene un fracturamiento moderado, por otro lado, la caliza tiene

un grado de fracturamiento menor, favorable a la calidad del macizo rocoso.

Es importante destacar que la desviación estándar es un valor muy elevado, lo cual indica que se debe de realizar una sub división para discretizar el comportamiento geomecánico.

Gráfico 6. Box plot de RMR por unidad litológica.



Se observa un rango de distribución muy amplio de la variable RMR para todas las litologías y un comportamiento estadístico diferenciado entre ellas. Todas las litologías tienen unos cuartiles moderados, sin embargo, la concordancia de la media y la mediana tiene una ligera variación.

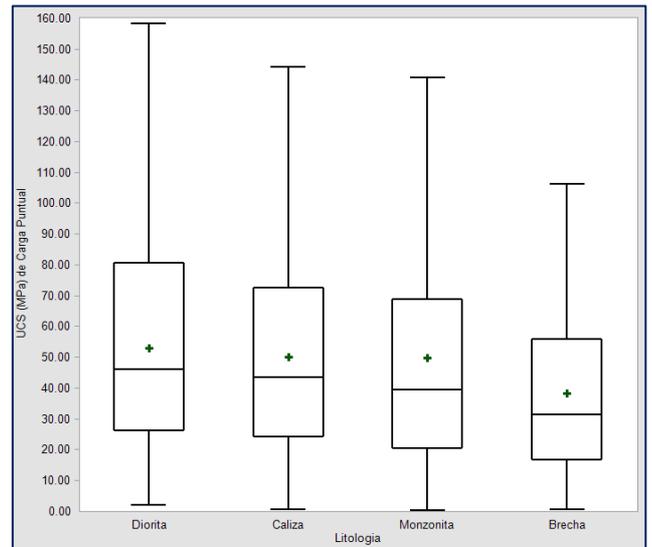
Tabla 10. Estadística de RMR por unidad litológica.

Litología	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
Diorita	14	92	45.7	34	42	57	17.3
Caliza	14	97	57.6	45	61	69	17
Monzonita	14	95	42.3	33	40	51	15.2
Brecha	14	95	48.7	36	47	62	16.8

El reporte estadístico muestra que la litología monzonita presenta una calidad de macizo rocos más baja, seguida de la diorita y la brecha, por otro lado, la caliza tiene una calidad de macizo rocoso más favorable.

Es importante destacar que la desviación estándar es un valor elevado, lo cual indica que se debe de realizar una sub división, para discretizar en mejor forma el comportamiento de la calidad del macizo rocoso.

Gráfico 7. Box plot de UCS de los ensayos PLT por unidad litológica.



Se observa un rango de distribución muy amplio de la variable UCS de los ensayos de carga puntual (PLT) para todas las litologías y un comportamiento estadístico diferenciado entre ellas. Todas las litologías tienen unos cuartiles moderados, sin embargo, la concordancia de la media y la mediana tiene una ligera variación.

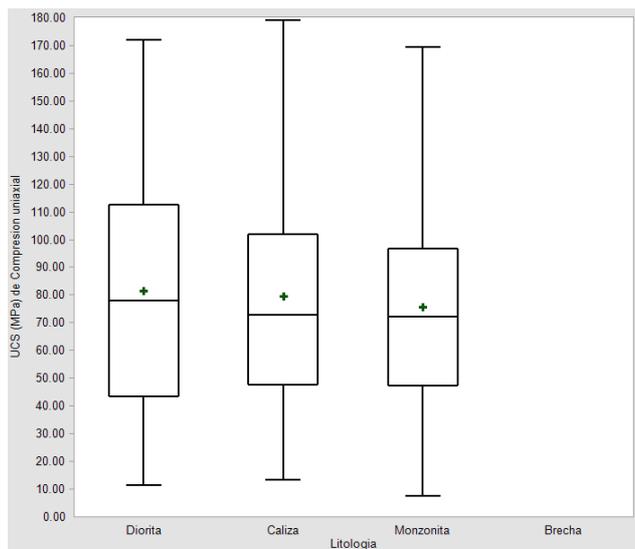
Tabla 11. Estadística de UCS de ensayos PLT por unidad litológica y tipo de rotura.

Litología	Tip Rotura	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
Diorita	Estructura	2.0	158.2	33.8	15.3	24.4	43.0	27.9
	Matriz	3.8	211.2	60.0	36.2	56.8	81.1	30.7
Caliza	Estru/Matr	37.7	68.7	56.0	37.7	48.9	68.6	15.3
	Estructura	0.7	347.2	33.0	13.3	23.9	42.2	31.4
Monzonita	Matriz	0.7	222.8	52.0	32.3	47.5	68.2	28.7
	Estru/Matr	4.6	95.8	45.2	30.3	45.8	59.7	21.9
Brecha	Estructura	0.3	342.2	35.6	12.4	24.4	45.9	34.6
	Matriz	0.6	339.7	57.0	28.8	46.7	74.0	43.0
Brecha	Estru/Matr	0.4	94.4	37.2	12.7	38.2	57.3	26.1
	Estructura	0.6	96.2	25.9	9.5	19.2	34.2	21.1
Brecha	Matriz	1.8	177.2	44.7	24.5	39.4	63.7	28.3
	Estru/Matr	13.7	106.1	40.3	24.2	29.3	47.7	29.1

El reporte estadístico muestra que la variable UCS de los ensayos PLT corresponden a una resistencia regular para todas las litologías, en el reporte también se observa la diferencia con los ensayos por su tipo de rotura, evidentemente las roturas por estructura tienen un comportamiento de menor resistencia.

Es importante destacar que la desviación estándar es un valor muy elevado, lo cual indica que se debe de realizar una sub división, para discretizar en mejor forma el comportamiento de la resistencia de la matriz rocosa.

Gráfico 8. Box plot de UCS de los ensayos uniaxial por unidad litológica.



Se observa un rango de distribución muy amplio de la variable UCS de los ensayos de compresión uniaxial para las litologías diorita, caliza y monzonita, las cuales tienen un comportamiento estadístico diferenciado entre ellas. Las tres litologías tienen unos cuartiles moderados, sin embargo, la concordancia de la media y la mediana tiene una ligera variación.

La litología brecha no registra ensayos de compresión uniaxial.

Tabla 12. Estadística de UCS de ensayos uniaxial por unidad litológica y tipo de rotura.

Litología	Tip Rotura	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
Diorita	Estructura	25.66	114.69	61.428	41.39	59.511	64.73	30.112
	Matriz	11.28	172.03	84.088	44.781	84.099	114.889	43.315
Caliza	Estructura	13.41	96.27	42.566	28.061	39.119	54.328	20.262
	Matriz	13.47	264.01	88.792	56.621	84.031	111.32	43.639
Monzonita	Estructura	8.36	126.47	49.029	31.512	42.51	61.179	25.828
	Matriz	7.37	253.19	85.032	59.062	81.961	101.17	40.667

El reporte estadístico muestra que la variable UCS de los ensayos de compresión uniaxial corresponden a una resistencia regular para todas las litologías, en el reporte también se observa la diferencia con los ensayos por su tipo de rotura, evidentemente las roturas por estructura tienen un comportamiento de menor resistencia.

Es importante destacar que la desviación estándar es un valor muy elevado, lo cual indica que se debe de realizar una sub división, para discretizar en mejor forma el comportamiento de la resistencia de la matriz rocosa.

4.1.2. ANÁLISIS DE HISTOGRAMAS

En esta sección se muestra los histogramas de frecuencia y su reporte estadístico del parámetro RMR, que se realizaron para todas las litológicas en combinación con la mineralización, la alteración y la resistencia estimada.

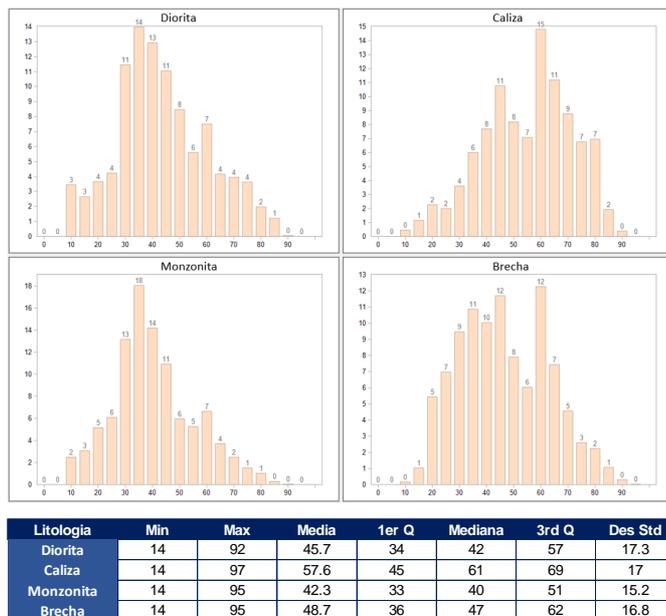
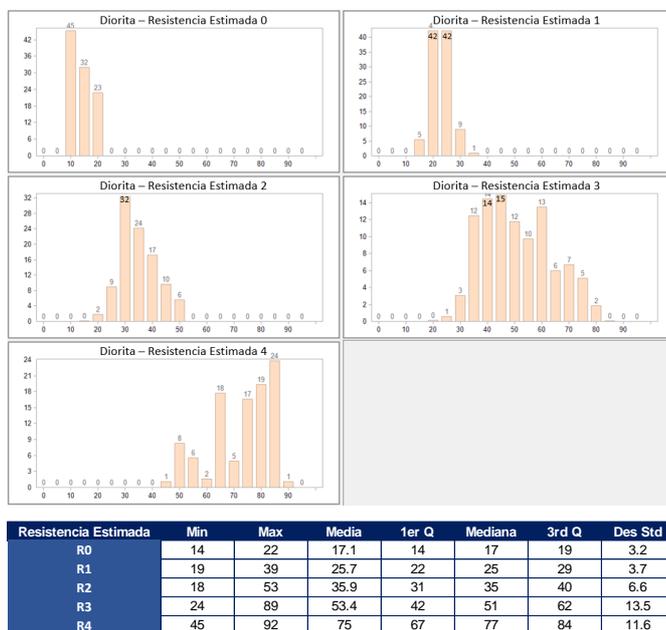


Figura 6. Histograma de RMR por litología.

A continuación, se muestra los histogramas de RMR y Resistencia Estimada por cada litología con su respectivo porcentaje de población.

a) Diorita



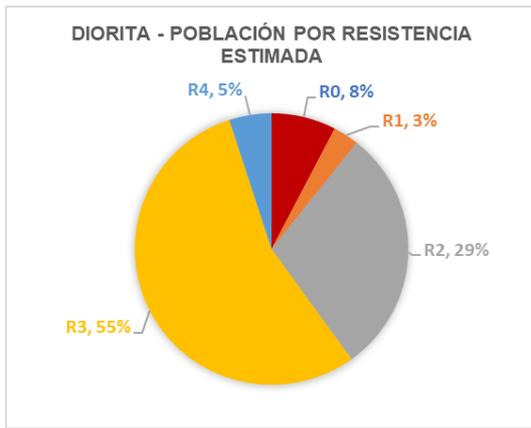
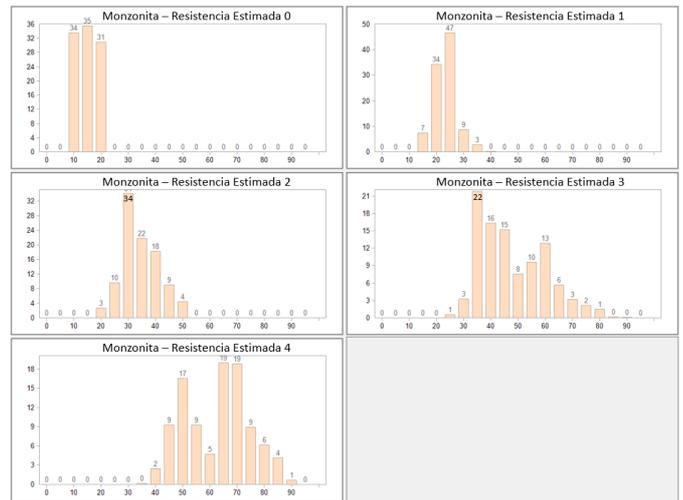
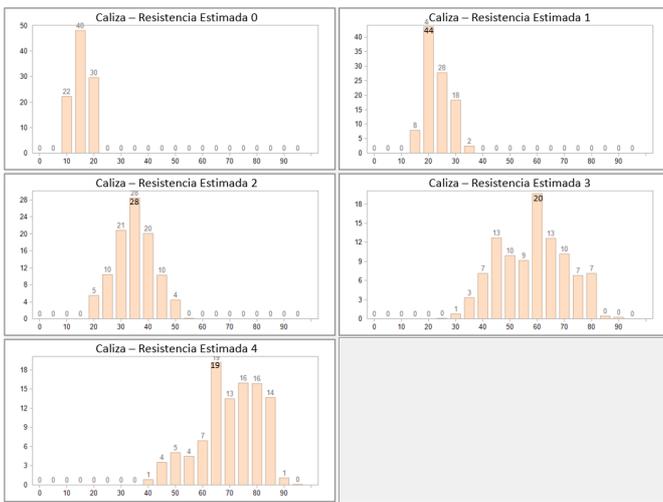


Figura 7. Histograma de RMR y resistencia estimada por diorita.



b) Caliza

Resistencia Estimada	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
R0	14	24	17.8	14	17	22	3.3
R1	19	44	26.4	22	27	29	4.4
R2	17	55	35.6	31	35	40	6.4
R3	22	94	49.9	39	47	61	12.8
R4	39	92	64.7	53	67	72	12.3



Resistencia Estimada	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
R0	14	24	18	17	17	22	3
R1	19	39	26.3	22	24	29	4.8
R2	20	55	36.2	31	36	41	7.2
R3	22	94	61	51	61	69	13
R4	42	97	72.4	66	74	82	11.2

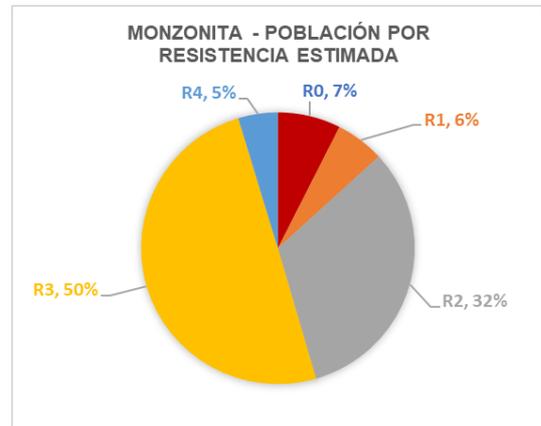


Figura 9. Histograma de RMR y resistencia estimada por monzonita.

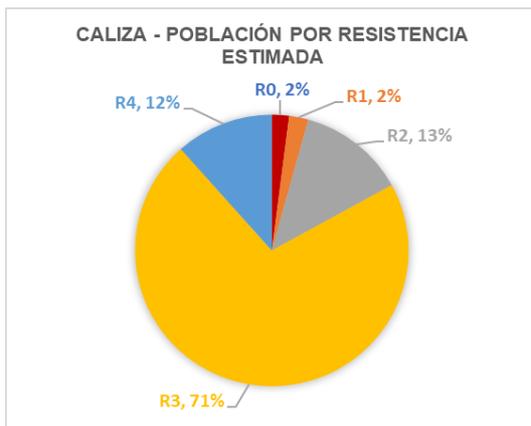
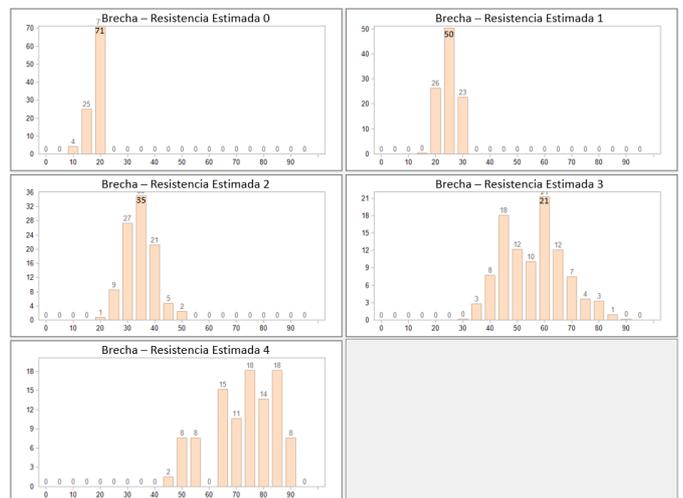


Figura 8. Histograma de RMR y resistencia estimada por caliza.

c) Monzonita

d) Brecha



Resistencia Estimada	Min	Max	Media	1er Q	Mediana	3rd Q	Des Std
R0	14	22	20.4	17	22	22	2.6
R1	19	34	26.7	24	27	29	3.2
R2	20	52	36.7	33	38	40	5.2
R3	33	94	58.4	47	59	67	11.9
R4	48	92	75.4	69	77	87	12.3

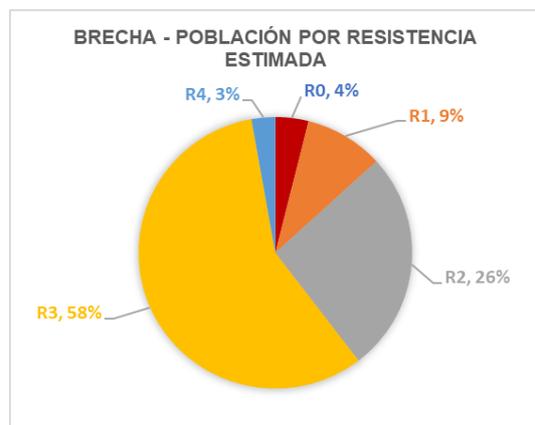


Figura 10. Histograma de RMR y resistencia estimada por brecha.

4.2. EVALUACIÓN DE ESTABILIDAD DE TALUDES DE MACIZOS ROCOSOS ALTERADOS

Los análisis de estabilidad fueron desarrollados por los métodos numéricos para obtener los contornos de factor de seguridad de los modelos geotécnicos en 2D, se han analizados 72 modelos, los cuales corresponden a la interacción de cuatro criterios de diseño geométrico, con cinco grupos de propiedades geomecánicas y tres escenarios de condición de agua.

4.2.1. CRITERIOS DE DISEÑO ANALIZADOS

Se han evaluados cuatro diseños geométricos los cuales tiene una variación en el ángulo global (OVA) y el ángulo interrampa (IRA) principalmente, para todos los diseños se ha considerado una altura de 600 m y la disposición equidistante de tres rampas.

A continuación, se detallan los diseños geométricos.

Tabla 13. Parámetros de diseño analizados.

Parámetros	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3	Diseño 4
Altura Total (m)	600	600	600	600
OVA (°)	48.2	45.3	40.5	35
Altura Interrampa (m)	150	150	150	150
IRA (°)	52.5	49.2	45	39
Ancho Rampa (m)	35	35	45	50
BFA (°)	75	65	65	55
Catch Bench (m)	7.5	7.5	8	8

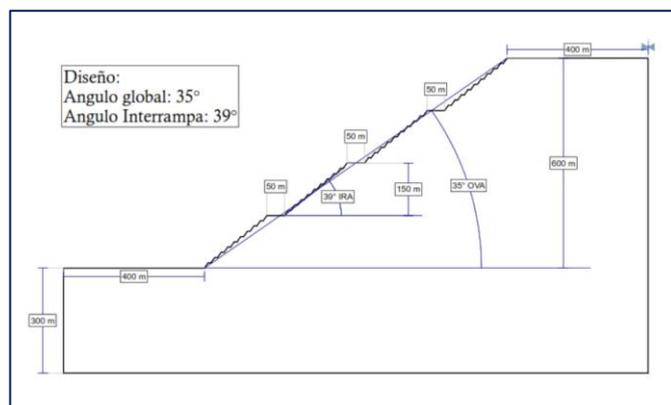


Figura 11. Perfil geométrico del diseño 4 (OVA 35 IRA 39).

4.2.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Los análisis de estabilidad se realizaron en el software computación FLAC – Slope v8.1, con el cual se obtuvieron los contornos de factores de seguridad de 72 modelos geotécnicos analizados.

FLAC/Slope es una versión especial y simplificada de FLAC para evaluar el factor de seguridad (FoS) de taludes de suelo y roca en dos dimensiones con una configuración del modelo y una ejecución del análisis sencillas y rápidas. (Itasca 2021).

El modelo constitutivo utilizado para los análisis es Hoek Brown modificado, el cual requiere los siguientes parámetros de entrada: GSI, resistencia de la compresión uniaxial, constante mi de roca intacta, factor de disturbancia y la densidad.

El criterio de aceptabilidad para el presente estudio es un factor de seguridad mayor o igual a 1.3 en la condición estática.

4.2.3. PARÁMETROS GEOMECÁNICOS DE LOS MATERIALES

Con los resultados de los análisis estadísticos de la sección 4, en donde se observó que la diferenciación del parámetro RMR por litología y la resistencia estimada, genera una mejor agrupación, se establecieron los parámetros geomecánicos para su evaluación de estabilidad,

Los análisis de estabilidad se realizaron planteando seis grupos de parámetros geomecánicos y de resistencia, en función al RMR; El primer grupo considera los parámetros del valor medio de la estadística descriptiva que se desarrolló en la sección 4, la siguiente tabla resume los parámetros de este grupo.

Tabla 14. Parámetros geomecánicos con RMR media = 46.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	UCS (kN/m ²)	m	s	a
Diorita D=1	Blue	25.6	Generalised Hoek-Brown	81000	0.227484	0.000117391	0.507707
Diorita D=0.7	Green	25.6	Generalised Hoek-Brown	81000	0.566013	0.000399184	0.507551
Diorita D=0	Cyan	25.6	Generalised Hoek-Brown	81000	1.59891	0.00247875	0.507551

Para los siguientes grupos se consideró los valores de RMR de la estadística que considera la resistencia estimada, desde R0 a R4.

- Parámetros geomecánicos con RMR R0 = 17.
- Parámetros geomecánicos con RMR R1 = 26.
- Parámetros geomecánicos con RMR R2 = 36.
- Parámetros geomecánicos con RMR R3 = 53.
- Parámetros geomecánicos con RMR R4 = 75.

Para todos los grupos se utilizó la información estadística de la unidad litológica diorita, el valor de la constante mi fue de 11, y en todos los modelos geotécnicos se incluyó el factor de disturbancia en franjas o halos, los primeros 20 metros con respecto a la cara del talud se aplicó un valor de D=1, los siguientes 30 metros se aplicó un valor de D=0.7 y el resto del material se aplicó un valor de D=0.

El factor de disturbancia incluye en los modelos geotécnicos el efecto de degradación o afectación de los parámetros de resistencia de los materiales, por los procesos de voladuras y las excavaciones de los taludes, estos procesos son propios del desarrollo de una operación minera.

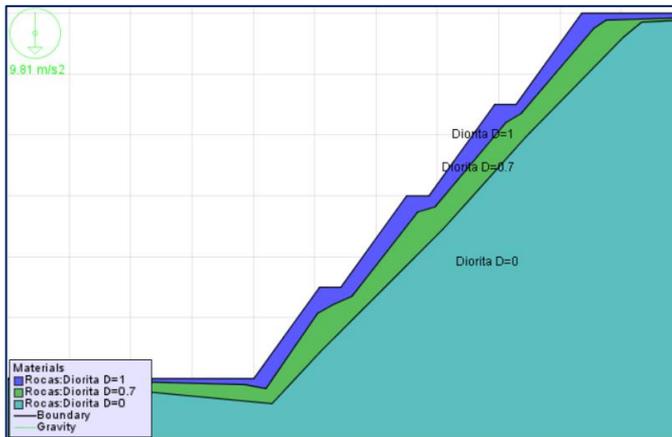


Figura 12. Modelo geotécnico con el factor de disturbancia.

4.2.4. ESCENARIOS DE CONDICIÓN DE AGUA

Para las simulaciones de estabilidad de los diseños propuestos, en el presente estudio se han considerado tres escenarios de condición de agua, con la finalidad de mostrar el impacto del factor hidrogeológico en los resultados del factor de seguridad para todos los diseños analizados.

Drenado: este escenario no tiene la presencia de agua en el modelo geotécnico, el cual se considera como el escenario más favorable para la estabilidad desde el punto de vista hidrogeológico.

Drenado 20 m.: este escenario tiene el criterio de distanciamiento en 20 metros del nivel freático con

respecto a la cara de los taludes, este escenario considera contar con un sistema de dewatering activo que busque drenar los taludes para favorecer a las condiciones de operación y a la estabilidad de los taludes.

4.2.5. RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD

A continuación, se muestra los resultados del factor de seguridad de los 72 modelos geotécnicos analizados.

Tabla 15. Resumen del factor de seguridad.

Parámetro Geomecánico	Escenario	OVA 48	OVA 45	OVA 40	OVA 35
		IRA 52	IRA 49	IRA 45	IRA 39
Media RMR = 46	Drenado	1.37	1.53	1.83	2.30
	Drenado 20m	0.98	1.15	1.47	1.81
	Saturado	0.74	0.88	1.01	1.40
R0 RMR = 17	Drenado	0.49	0.55	0.71	0.83
	Drenado 20m	0.38	0.47	0.65	0.82
	Saturado	0.20	0.28	0.35	0.49
R1 RMR = 26	Drenado	0.72	0.81	0.96	1.34
	Drenado 20m	0.51	0.66	0.87	1.10
	Saturado	0.33	0.43	0.54	0.72
R2 RMR = 36	Drenado	1.08	1.15	1.38	1.68
	Drenado 20m	0.72	0.87	1.15	1.44
	Saturado	0.53	0.62	0.74	1.09
R3 RMR = 53	Drenado	1.67	1.86	2.24	2.79
	Drenado 20m	1.30	1.46	1.81	2.24
	Saturado	1.01	1.14	1.35	1.73
R4 RMR = 75	Drenado	3.32	3.52	3.91	4.41
	Drenado 20m	2.76	2.88	3.21	3.65
	Saturado	2.56	2.80	3.16	3.58

Gráfico 9. FoS en función a los diseños del talud.

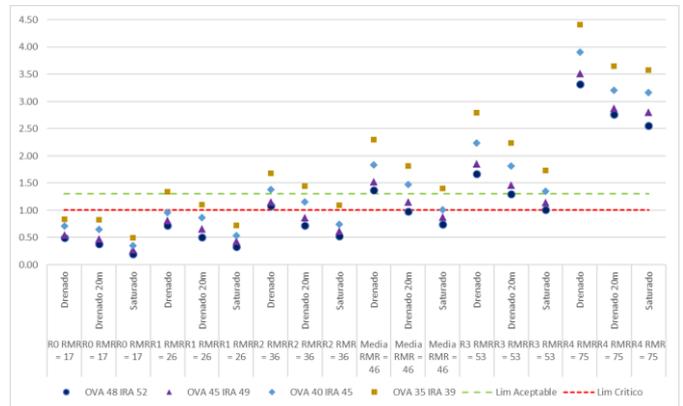


Gráfico 10. FoS en función al RMR

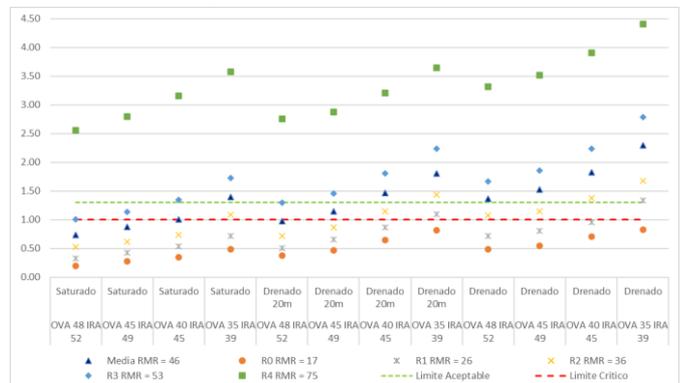
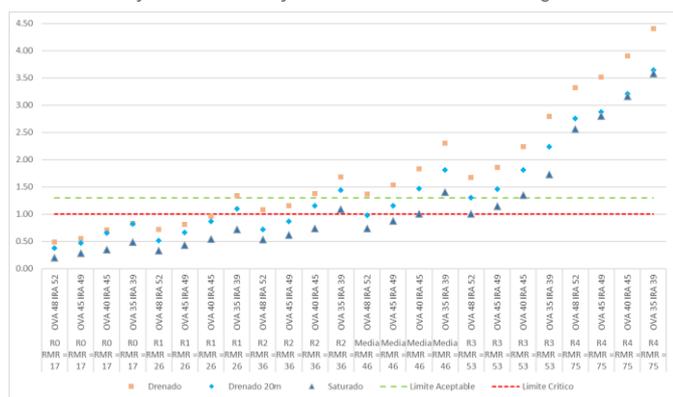


Gráfico 11. FoS en función a la condición de agua.



De las gráficas 9 – 11, se observa que los factores de seguridad del RMR Medio se ubica en un nivel intermedio en el cumplimiento de los criterios de aceptabilidad y el límite crítico, para los RMR de R0 a R2 en combinación con los diseños con ángulos más elevados no cumple con los criterios de aceptabilidad, pero muestra una tendencia a mejorar el factor de seguridad a medida que los diseños tienen ángulos más bajos y condiciones de agua drenadas.

Para los resultados de R3 y R4, gran parte de los factores de seguridad cumplen con los criterios de aceptabilidad, solo se tiene 02 casos en donde la condición de agua es saturada que no cumple.

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. CRITERIO DE CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA

La población analizada para la caracterización de macizos rocosos alertados, según la litología tiene los siguientes porcentajes, monzonita 66%, caliza 21%, diorita 7% y brecha 5%; por otro lado, de acuerdo a la mineralización solo la monzonita y la diorita tienen en ambos casos un 70% de mineral (ver las gráficas 1 y 2).

Para el caso de los ensambles de alteración mineralógica asociados a la génesis de los yacimientos mineros, la alteración potásica tiene un 49% de contenido, seguido de la alteración freatomagmática con un 7% y el resto de alteraciones juntas suman el 10%; ahora la alteración supérgena asociada a los procesos de meteorización tienen un contenido de 16%, las rocas que no presentan alteración corresponden a un 17% la cual está asociada principalmente a la caliza (ver la gráfica 3).

De acuerdo a los gráficos de población que se muestra en la gráfica 4, los macizos rocosos alterados que corresponde de la clase R0 a R2, siguiendo el criterio de resistencia estimada de ISRM, tiene un contenido de población del 39%. La clase R3 que corresponde a macizo rocoso regulares tiene una población de 55% y

la clase R4 que corresponde a macizos rocosos de buena calidad tiene una población de 6%.

Con el análisis estadístico realizado a todas las variables geomecánicas de la base de datos, en las tablas 9 y 10 se ha observado que la data geomecánica tiene un alto rango de distribución de la población, esto también se evidencia en los valores de desviación estándar obtenidos, la cual en varios casos representa un 25% de la población, siendo este un valor muy alto para evaluar el comportamiento geomecánico de la calidad de los macizos rocosos alterados.

El histograma de frecuencia del RMR por cada litología de la figura 6, muestra que el RMR tiene un rango de mínimos y máximos de 14 a 95, con una desviación estándar de 16 promedio y un valor medio 45 para las rocas intrusivas (diorita y monzonita) y la brecha, y un valor un poco más alto de 57 para la caliza, esto indicaría que la calidad del macizo rocoso de la base de datos en general es regular a buena. Sin embargo, esta estadística no nos permite diferenciar los macizos rocosos alterados.

Los análisis estadísticos de RMR empleando los factores de mineralización y alteración, que por concepto se entiende que la calidad del macizo rocoso es de baja calidad por los procesos de presión y temperatura relacionados a la genética de los yacimientos. Sin embargo, en los box plot y reportes estadísticos que se muestran en la sección 4.1.1., se observa que la variabilidad de la data es muy amplia y solo para las alteraciones supérgena y argílica en las rocas intrusivas se tiene una calidad de macizo rocoso más bajo. Por lo tanto, este análisis aun no permite realizar una diferenciación clara de los macizos rocosos alterados.

En los histogramas de frecuencia para la variable resistencia estimada por cada tipo litológico que se muestran en las figuras 7 a la 10, se aprecia una mejor distribución de los rangos de la variable RMR, en los cuales se tiene un valor de RMR entre 26 y 37 para las resistencias estimadas de R1 y R2 respectivamente; de acuerdo a la definición del ISRM, los macizos rocosos para R1 y R2 corresponden a rocas alteradas y golpeando firmemente con la punta del martillo de geólogo se logra una marca poca profunda de deformación.

Para el caso de R0, de acuerdo al ISRM corresponde a un material del tipo relleno o panizo de falla, su comportamiento es similar a un suelo.

El R3 y R4 aun muestran un rango de distribución aun moderadamente amplio, con valores de desviación estándar mayores al 10% de la población, y los histogramas muestran en algunos casos hasta dos familias.

Luego del análisis de los resultados de la estadística realizada a la variable RMR para la caracterización de macizos rocosos alterados, se puede confirmar, que emplear la resistencia estimada para la definición de unidades geotécnicas es favorable para la base de datos del presente estudio, esto debido a que permite diferenciar claramente los valores de RMR apropiados para este tipo de macizos rocoso.

Es importante destacar que el porcentaje de la población de macizos rocosos alterados por unidad litológica, que está representada por la resistencia estimada de R0 a R2 es de 39%, solo para la litología caliza el porcentaje es de 17%, por lo tanto, en la base de datos analizada, se requiere diferenciar este tipo de materiales que conforma una población con probabilidad de falla.

5.2. RESULTADO DE ESTABILIDAD

Los resultados del factor de seguridad de los 72 modelos geotécnicos reportan que se tiene un 54% que no cumple con el criterio de aceptabilidad de un FoS 1.3 y un 42% no cumplen el límite crítico de un FoS de 1.0.

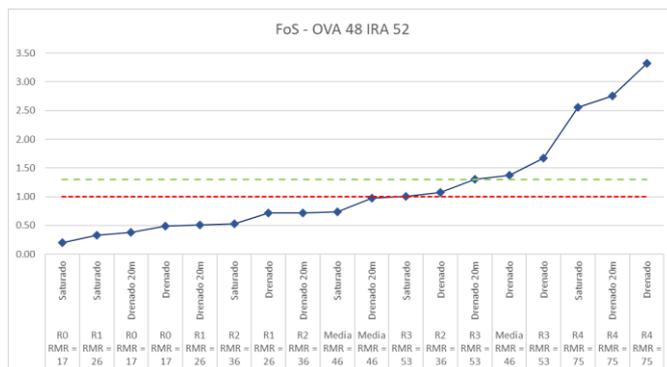
Cuando se utilizó el valor medio del RMR en los análisis, se obtuvo que cinco modelos no cumplieron el criterio de aceptabilidad de los doce modelos evaluados, para los casos de R1 y R2 en donde se utilizó el criterio resistencia estimada para definir el RMR, se obtuvieron que once y nueve modelos no cumplieron con el criterio de aceptabilidad de los doce modelos geotécnicos analizados para cada uno.

Esta diferencia entre el valor medio, el R1 y el R2, que corresponde a seis y cuatro respectivamente, representa el porcentaje de zonas de riesgo que no fueron identificados con el análisis del valor medio, por lo tanto, toma relevancia realizar la diferenciación de macizos rocosos alterados en el modelamiento geotécnico.

Otro aspecto importante a considerar es que cuando se utiliza el valor medio del RMR, se observa en el histograma de frecuencia, que se tiene un porcentaje no menor al 30% del RMR que corresponde a macizos rocoso alterados, los cuales no están siendo considerados en los resultados del factor de seguridad, a diferencia de cuando se utiliza la resistencia estimada para la definición del RMR.

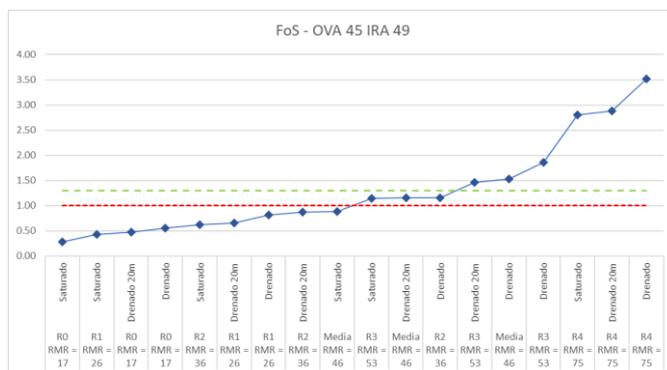
Las siguientes graficas muestra el comportamiento del factor de seguridad en función a los diseños geométricos de talud, a la diferenciación del parámetro RMR por la resistencia estimada y a los escenarios de condición de agua, por cada caso analizado.

Gráfico 12. Tendencia del FoS para el diseño OVA 48 e IRA 52.



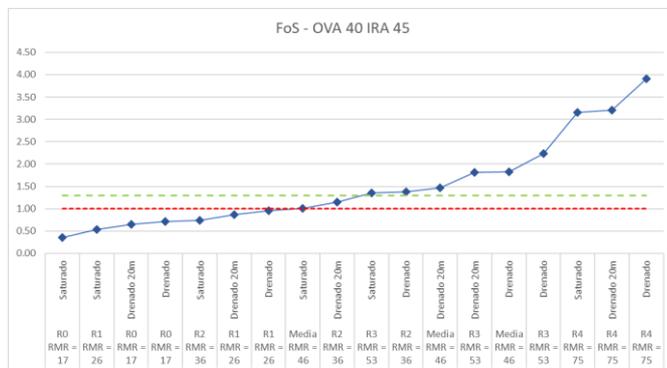
Para el diseño 1, en donde el ángulo global considerado es de 48° y el ángulo interrampa es de 52°, los factores de seguridad que cumplen con el criterio de aceptabilidad son a partir del grupo R3 con una condición de agua drenada 20m y RMR Media con una condición de agua drenada.

Gráfico 13. Tendencia del FoS para el diseño OVA 45 e IRA 49.



Para el diseño 2, en donde el ángulo global considerado es de 45° y el ángulo interrampa es de 49°, los factores de seguridad que cumplen con el criterio de aceptabilidad son a partir del grupo R3 con una condición de agua drenada 20m y RMR Media con una condición de agua drenada.

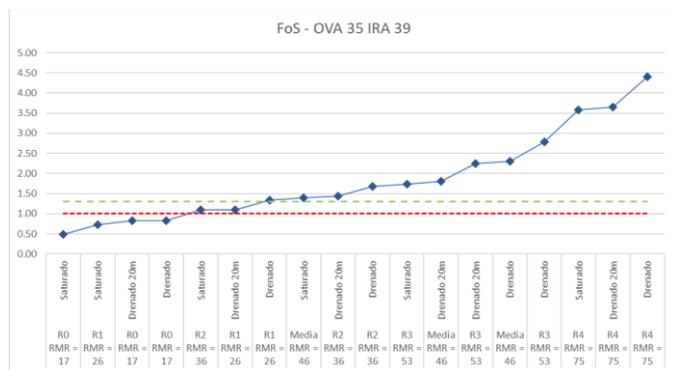
Gráfico 14. Tendencia del FoS para el diseño OVA 40 e IRA 45.



Para el diseño 3, en donde el ángulo global considerado es de 40° y el ángulo interrampa es de 45°, los factores de seguridad que cumplen con el criterio de aceptabilidad son a partir del grupo R3 con una

condición de agua saturado y R2 con una condición de agua drenada.

Gráfico 15. Tendencia del FoS para el diseño OVA 35 e IRA 39.



Para el diseño 4, en donde el ángulo global considerado es de 35° y el ángulo interrampa es de 39°, los factores de seguridad que cumplen con el criterio de aceptabilidad son a partir del grupo R1 con una condición de agua drenada y RMR Media con una condición de agua saturada.

6. Conclusiones

1. De acuerdo al criterio de resistencia estimada, los macizos rocosos alterados se ubican en las categorías de R0 a R2; la categoría R0 está definido como un material extremadamente débil, en la mecánica de rocas se asigna aun material de relleno de falla (panizo) y las categorías de R1 y R2 corresponden a rocas que pueden ser desmenuzadas y deformadas por golpes firmes del martillo de geólogo.

2. La aplicación de la resistencia estimada en la caracterización geomecánica permite determinar que el 39% de la población de la base de datos geomecánica corresponde a macizos rocosos alterados, seguido de un 55% de la población que corresponde a macizos rocoso de regular calidad y finalmente el 6% de la población corresponde a macizos rocoso de buena calidad.

3. Los análisis estadísticos para definir las unidades geotécnicas muestran que los cruces del RMR y el criterio de resistencia estimada del ISRM para cada unidad litológica, ha permitido obtener una mejor diferenciación de los macizos rocosos alterados (categorías del R0 a R2), a diferencia de los resultados obtenidos con la mineralización y la alteración.

4. Las unidades geotécnicas y parámetros geomecánicos fueron definidos con los histogramas de frecuencia de la resistencia estimada, debido a que muestran una mejor distribución de los rangos de la variable RMR para las resistencias estimadas de R0 a R2, los cuales tienen un valor de RMR entre 17 a 37 respectivamente; de acuerdo a Stacey 2018, estos

valores corresponderían a los macizos rocosos alteradas.

5. El análisis de estabilidad de los macizos rocosos alterados obtuvo que un 54% de los 72 modelos geotécnicos evaluados no cumple con el criterio de aceptabilidad, de los cuales, varios corresponden a los diseños optimistas con ángulos globales de 48° - 45°, interrampas de 52° - 49° y condiciones de agua saturados. También dentro de este porcentaje se encuentra toda la categoría R0 debido a su muy baja calidad de macizo rocoso.

6. El porcentaje de los factores de seguridad que cumplen con el criterio de aceptabilidad para el diseño OVA 35 IRA 39 es de 67%, para el diseño OVA 40 IRA 45 es de 50 %, finalmente para los diseños OVA 45° IRA 49 y OVA 48 IRA 52 es de 33%.

7. De los resultados de estabilidad obtenidos del valor medio del RMR en los análisis, muestran que cinco modelos no cumplieron el criterio de aceptabilidad de los doce modelos evaluados para este caso, para los casos de R1 y R2 en donde se utilizó el criterio resistencia estimada para definir el RMR, se obtuvieron que once y nueve modelos no cumplieron con el criterio de aceptabilidad de los doce modelos geotécnicos; estas diferencias entre el valor medio, el R1 y el R2, representa el porcentaje de zonas de riesgo que no fueron identificados en el análisis del valor medio, por lo tanto, es importante realizar la diferenciación de macizos rocosos alterados en el modelamiento geotécnico.

8. Los parámetros de diseño para los macizos rocosos alterados son los siguientes, para la categoría R2 los diseños de OVA 40° y 35° ambos en condiciones drenadas (alejado el agua 20 metros a más de la cara del talud) cumplen con el criterio de aceptabilidad, para la categoría R1 solo el diseño de OVA 35° en condición drenada cumple con el criterio de aceptabilidad y para la categoría R0 no se cumple con los criterios de aceptabilidad.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por brindarnos sus bendiciones en la salud y pedir en oración por la salud de todas las personas del mundo.

Agradezco con mucho cariño a mi esposa, hija, padres y a toda mi familia, que siempre acompañan mis pasos y en quienes constantemente está el deseo que seamos mejores personas y excelentes profesionales.

Finalmente agradezco a mi asesor de la tesis por su constante apoyo y a todos los docentes de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa quienes aportaron en mi crecimiento profesional.

Referencias [apellidos en minúsculas]

- Alvarado, F. (2020) Modelamiento Geoestadístico De La Clasificación Geomecánica De Bieniawski (RMR). Universidad de Chile, Santiago de Chile. Pag. 10 - 17.
- Bernabé, H., Anzardo, A., & Villon, G., (2006) Potencial Geológico Del Depósito De Porfido-Skarn De Cu (Ag-Au-Mo) De Antapaccay Cusco Perú. Xstrata Tintaya S.A, Cusco, Perú.
- Bieniawski, ZT. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.
- Bieniawski, ZT. (1989) Engineering Rock Mass Classification: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering, USA, 251 p.
- Bieniawski, ZT. (2011) Errores en la aplicación de las Clasificaciones Geomecánicas y su corrección. ADIF - Geocontrol Caracterización Geotécnica del Terreno. Madrid, España. pp 35
- Brown, E. (1981) Rock Characterization Testing and Monitoring - ISRM Suggested Methods. Pergamon, Oxford, England, 211 p.
- Cardozo, M. 2002. Los Andes Peruanos: Geología y Potencial Minero. Ministerio Energía y Minas del Perú. Presentación ppt. 31 pp.
- Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W. & Jaimes, F. (1998). Geología de los Cuadrángulos de Soledad y Alegria, Hojas 25-x y 25-y. INGEMMET Boletín Serie A: Carta Geológica Nacional, n. Pag 107 - 176.
- Castro, L., Carvalho, J. & Sá, G. (2013) Discussion on how to classify and estimate strength of weak rock masses. Slope Stability 2013, Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- Clark, A., Farrar, E., Kontak, D., Langridge, R. & Arena, M. (1990). Geologic and Geochronology Constraints on the Metallogenic Evolution of the Andes of Southeastern Peru. Economic Geology, vol. 85, pag. 1520 – 1583.
- De La Cruz, N. (1995) Carta Geológica Nacional; Geología de los Cuadrángulos de Velille, Yauri, Ayaviri y Azangaro. INGEMMET, Lima, Perú, 3-11 p,17-77.
- González de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C. (2002) Ingeniería Geológica. Perason Educación, Madrid, España.
- Hoek, E. (1995). Estimating Mohr-Coulomb Friction and Cohesion Values from the Hoek -Brown Failure Criterion. International Journal Rock Mechanics Mining Science. & Geomechanics. Abstract, 27, pp. 227 -229.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B. (2002) Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. In R. Hammah,
- W. Bawden, J. Curran, and M. Telesnicki (Eds.), Proceedings of NARMSTAC 2002, Mining Innovation and Technology. Toronto. 10 July 2002, pp. 267—273. University of Toronto.
- Lorig, L. & Gómez, P. (2008) Informe de Opinión Geotécnica para el Proyecto Antapaccay. ITASCA, Santiago, Chile, 24 p.
- Maldonado, A. & Vargas, J. (2006) Informe geotécnico preliminar de la Geología Estructural de Antapaccay, BHP BILLITON Tintaya, Cusco, Perú.
- Maldonado, A. (2007) Criterios empleados para la compilación de información geotécnica utilizando ventanas de muestreo (Window mapping). Xstrata Tintaya S.A, Cusco, Perú.
- Martin, D. & Stacey, P. (2018) Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rock. CSIRO Publishing Australia and New Zealand.
- NGI (2015) Using the Q-system Rock mass classification and support design. Oslo, Norway. pp 56
- Perelló, J. (2001) Geología y Recursos Geológicos del Proyecto Cotabambas, Departamento de Apurimac, Perú. Reporte Interno para Antofagasta Minerals S. A. Gerencia de exploraciones. 70 pag.
- Perelló, J., Carlotto, V., Zárate, A., Ramos, P., Posso, H., Neyra, C., Caballero, A. (2003) Porphyry-Style alteration and mineralization of the middle Eocene to Early Oligocene Andahuaylas – Yauri Belt, Cuzco región, Peru. Economic Geology, V. 98, Pag. 1575 – 1605.
- Rivera, R. & Santisteban, A. (2010) Dispersión Geoquímica Secundaria y su Relación con los Depósitos Minerales del Batolito Andahuaylas Yauri - Proyecto GE-24 "Evaluación del Potencial de los Depósitos Minerales en el Batolito Andahuaylas - Yauri". INGEMMET, Lima, Perú.
- Rivera, R., Acosta, J., Chul, H., Ryoo, Ch., Bustamante, A., Villarreal, E. & Santisteban, A. (2011) Metalogenia Del Batolito Andahuaylas – Yauri Y Sus Implicancias En La Exploración De Pórfidos Cu – Au. INGEMMET, Lima, Perú.
- Rodríguez, M. (2008) Estabilidad de Taludes en Minería I y II. INTERCADE, Lima, Perú, cap. 1.
- Ticona, G. (2010) Modelamiento Geotécnico y Análisis de Estabilidad por Sectores del Pit Norte y Sur del Proyecto Antapaccay. Universidad Nacional de San Agustín Arequipa, Perú. Pag 18 - 27.

Perfil profesional

Magister en Geotecnia con más de 15 años de laburo en el sector minero, sólida experiencia en Geotecnia, Hidrología e Hidrogeología para Tajos, Depósitos de Desmonte, Presas de Relaves Operativas y en Cierre y Proyectos, aplicada a Operaciones de gran minería y de clase mundial como Antapaccay Operación, Chinalco, Las Bambas Operación, Proyecto Las Bambas, CMDI Collahuasi (Chile), Proyecto Antapaccay, Tintaya y Toquepala.

Nombre del autor

MSc. Gian Carlo Ticona Jove

Cargo

Gerente del Área Técnica

Empresa

Geomechanics And Environment SAC

Correo electrónico

gticona@geoenv.pe

gticonaj@gmail.com

Teléfono / Celular

953706120

Dirección

**Av. Del Parque 122, Ubr. La Planicie La Molina, Lima,
Perú.**