ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN GEOLOGÍA Y PETRÓLEOS

EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE TALUDES, EN SAN ANTONIO DE PICHINCHA, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN DE MACIZOS ROCOSOS, PARA EL ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA.

TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO GEÓLOGO

OPCIÓN: ESTUDIO TÉCNICO

ALEJANDRO PATRICIO VACA CASTILLO

alejo_vacan@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. DIEGO RENATO CÁRDENAS CÁRDENAS

diego.cardenas@epn.edu.ec

CO-DIRECTORA: Ing. ELIANA FERNANDA JIMÉNEZ ALVARO

eliana.jimenez@epn.edu.ec

Quito, Enero 2018

DECLARACIÓN

Yo, Alejandro Patricio Vaca Castillo, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

_____

Alejandro Patricio Vaca Castillo

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Alejandro Patricio Vaca Castillo, bajo nuestra supervisión.

Ing. Diego Cárdenas MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Eliana Jiménez MSc.
CODIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la vida y a todas las personas que supieron brindar el apoyo necesario para volver por el camino más difícil y demostrar que la discapacidad solo se encuentra en la mente.

DEDICATORIA

Esta tesis es dedicada a todos los trabajadores que se esfuerzan todos los días por llevar un plato de comida a sus hogares. Como cada tarde al dirigirme a casa, la motivación y admiración de aquellos vendedores que no se desanimaban, aunque la vida no les proporcionara muchas riquezas, mantienen su espíritu y disciplina de no rendirse en aquellas circunstancias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN ..... **II**
CERTIFICACIÓN ..... **III**
AGRADECIMIENTO ..... **IV**
DEDICATORIA ..... **V**
ÍNDICE DE CONTENIDO ..... **VI**
ÍNDICE DE FIGURAS PRINCIPALES ..... **IX**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **IX**
RESUMEN ..... **XI**
ABSTRACT ..... **XII**
INTRODUCCIÓN **1**
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 1
JUSTIFICACIÓN 2
Justificación teórica 2
Justificación Metodológica 3
Justificación Práctica 3
HIPÓTESIS 4
OBJETIVO GENERAL 4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 4
ALCANCE 5
CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL **6**
1.1 LOCALIZACIÓN 6
1.1.2 Estudios Previos 7
1.2 ASPECTO SOCIOECONÓMICO 7
1.2.1 Problemática de inestabilidad en canteras 8
1.3 ASPECTO FÍSICO 8
1.3.1 Geomorfología 8
1.3.2 Clima 9
1.4 GEOLOGÍA DE LA ZONA 9
1.4.1 Unidad Pallatanga (Santoniano) 10
1.4.2 Unidad Natividad (Campaniano – Masstrichtiano) 10
1.4.1 Formación Pisque (Plioceno) 10
1.4.2 Formación San Miguel (Pleistoceno Inferior) 11
1.4.3 Formación Mojanda –Fuya Fuya (Pleistoceno Medio) 11

1.4.4 Formación Cangahua (Pleistoceno Superior) 12
1.4.5 Formación Pululahua (Holoceno) 12
1.4.6 Depósitos Holocénicos 12
1.4.7 Mapa Geológico de la zona 12
1.5 CONCEPTOS GENERALES 14
1.5.1 Taludes en roca 14
1.5.2 Mecánica de Rocas 14
1.5.3 Índice RMR o clasificación Geomecánica 14
1.5.4 Resistencia a la compresión simple 16
1.5.5 Martillo de Schmidt 16
1.5.6 Ensayo de carga puntual 17
1.5.7. RQD 18
1.5.8 Orientación 19
1.5.9 Espaciado 19
1.5.10 Continuidad 19
1.5.11 Rugosidad 20
1.5.12 Abertura 21
1.5.13 Relleno 21
1.5.14 Agua freática 21
1.5.15 Alteración 22
1.6 Clasificación SMR 22
1.6.1 Factores 23
1.6.2 Tipos de Rotura que generan FRM 23
1.7 Índice Q 25
1.7.1 Índice Q-slope 26
1.8 Variograma 27

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA 28

2.1 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN RMR 29
2.1.1 Determinación del RQD 32
2.2 MÉTODOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE 32
2.2.1 Método utilizando el Esclerómetro o Martillo de Schmidt 32
2.2.2 Método de ensayo de carga puntual 33
2.2.3 Método de ensayo de compresión simple 36
2.3 METODOLOGÍA PARA CLASIFICAR LOS MACIZOS ROCOSOS 38
2.4 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN SMR 39
2.5 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN ÍNDICE Q-SLOPE 41

2.6 MÉTODO PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE CALIDAD DE ROCA (RQD) 43
2.6.1 Estudio Micropetrográfico 44
2.6.2 Estudio de Ensayo de Difracción de Rayos X 44
2.6.3 Modificación al índice RQD 44
2.7 MÉTODO PARA REALIZAR EL MAPA GEOTÉCNICO 52
2.7.1 Método de simulación basado en celdas 52
2.7.2 Modelamiento y simulación 54
2.7.3 Explicación del método 59
2.8 MÉTODO PARA VER LA DISTRIBUCIÓN DEL RQD EN LA ZONA DE ESTUDIO. 61
2.9 MÉTODO PARA REALIZAR EL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD 67

CAPÍTULO III: RESULTADOS 70

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS (RMR) 70
3.2 RESULTADOS OBTENIDOS DEL RQD 78
3.3 RESULTADOS DEL ENSAYO DE CARGA PUNTUAL 79
3.4 RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE 82
3.4.1 Correlación entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple 83
3.5 RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DE LOS MACIZOS ROCOSOS (RMR) 84
3.6 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA CLASIFICACIÓN (SMR) 85
3.7 RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE Q-SLOPE 87
3.8 RESULTADOS OBTENIDOS DEL AJUSTE DE CORRECCIÓN AL RQD 97
3.9 MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DEL RQD Y GEOTÉCNICO 101
3.10 MAPA DE PENDIENTES 107
3.11 MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD DE FRM DE LA ZONA DE ESTUDIO 108

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 110

4.1 FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA INESTABILIDAD DE UN TALUD 110
4.1.1 Factores Inherentes 110
4.1.2 Factores que disminuyen la resistencia al corte 113
4.1.3 Discusión 114
4.2 POSIBLES OBRAS DE MITIGACIÓN CONTRA LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA (FRM) 117
4.2.1 Configuración geométrica 117
4.2.2 Barreras Estáticas 118
4.2.3 Malla de triple torsión 119
4.2.4 Barrera Dinámica 120

4.3 CONCLUSIONES 121
4.4 RECOMENDACIONES 123

BIBLIOGRAFÍA 125

ÍNDICE DE FIGURAS PRINCIPALES

Figura 1 Localización de la zona estudio 6
Figura 3 Mapa Geológico de la zona de San Antonio de Pichincha - Perucho 13
Figura 5 Dimensiones de la muestra para Ensayos de Carga Puntual……17
Figura 8 Resumen de parámetros del RMR 21
Figura 15 Diagrama de flujo sobre la metodología del estudio……....28
Figura 23 Resistencia vs Alteración……47
Figura 25 Resistencia vs Microfisuras……48
Figura 52 Mapa de las orientaciones preferenciales de las discontinuidades 75
Figura 59 Mapa de índice RQD no corregido 102
Figura 60 Mapa de índice RQD corregido 103
Figura 61 Mapa Geotécnico 105
Figura 62 Mapa Geotécnico corregido 106
Figura 63 Mapa de pendientes de la zona de estudio 107
Figura 64 Mapa de Susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa 108
Figura 65 Análisis de la Susceptibilidad……...109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas del área de estudio 7
Tabla 2 Parámetros geomecánicos (Bieniawski, 1989) 15
Tabla 3 Índice SMR 22
Tabla 4 Factor de orientación de discontinuidad…….....26
Tabla 5 Descripción Geomecánica de los macizos rocosos 29
Tabla 6 Caracterización de los macizos 31
Tabla 7 Ensayo de carga puntual 35
Tabla 8 Ensayo de compresión simple 38
Tabla 9 Calidad de macizos rocosos 38
Tabla 10 Factores del índice SMR 39

Tabla 11 Estabilidad de los macizos rocosos 39
Tabla 12 Caracterización con el índice Q-slope 41
Tabla 13 Clasificación del índice Q 43
Tabla 14 Índice de alteración 45
Tabla 15 Relación entre el estado de alteración y resistencia 45
Tabla 16 Resultados obtenidos del índice de alteración y resistencia 46
Tabla 17 Nuevo porcentaje de mineral alterado 48
Tabla 18 Nuevo porcentaje de microfisuras 49
Tabla 19 Ajuste al RQD 50
Tabla 20 Ejemplo aplicado al ajuste RQD 51
Tabla 21 Calidad de roca 51
Tabla 22 Ficha que indica la caracterización general de los macizos rocosos 70
Tabla 23 Resultados obtenidos en la caracterización de los macizos rocosos 72
Tabla 26 Índice de calidad de roca 78
Tabla 27 Datos de ensayo de carga puntual 79
Tabla 29 Valores de carga puntual correlacionados con la compresión simple 81
Tabla 31 Valores de resistencia a la compresión simple 82
Tabla 32 Clasificación de los macizos rocosos RMR 84
Tabla 33 Clasificación SMR 85
Tabla 34 Clase de estabilidad 86
Tabla 35 Clasificación a través del índice Q-slope 87
Tabla 39 Resultados Q-slope 95
Tabla 40 Correlación del índice Q con el índice RMR 96
Tabla 41 Ajuste corrección mediante el índice de alteración (Ip') 98
Tabla 42 Valores corregidos RQD 99
Tabla 43 Valores corregidos SMR 100
Tabla 44 Valores de Susceptibilidad 122

RESUMEN

Este proyecto fue ejecutado en la zona de San Antonio de Pichincha – Perucho, a 12 Km en dirección Norte de la ciudad de Quito. El ambiente geológico de la zona se encuentra caracterizado por la presencia de formaciones geológicas que están conformando macizos rocosos, flujos piroclásticos, depósitos lagunales, depósitos coluviales y terrazas. Los diferentes macizos rocosos fueron evaluados a través de las condiciones de sus parámetros físicos – mecánicos determinando valores de calidad geomecánica propuesto por Bieniawski en 1973, los cuales permiten analizar la estabilidad de los taludes naturales o artificiales.

El índice de calidad de roca (RQD) es uno de los parámetros geomecánicos preponderantes y que se desarrolló en 1963 por Deere, el cual permitió caracterizar a los macizos rocosos a través de testigos de perforación, pero Priest y Hudson en 1976 diseñaron un método superficial, donde la relación entre el número de fisuras sobre un espacio específico determinaría el valor de este índice. En estos últimos años el índice RQD ha sido modificado a través de otros factores que estaban presentes en el macizo rocoso pero no se consideraban. El actual estudio propuso ajustar al índice RQD por medio de los minerales de alteración ya que se consideran un factor muy importante para la calidad y estabilidad del talud.

Para realizar esta modificación primero se identificará los minerales de alteración utilizando análisis micropetrográficos y Ensayos de Difracción de Rayos X. Después se obtendrá el índice de alteración propuesto por Irfan y Dearman en 1978, el cual proporcionará un valor que procederá a realizar la corrección al índice RQD.

Una vez obtenido los nuevos valores de calidad se construirá diferentes modelos geoestadísticos que identifiquen las zonas con mayor y menor calidad y también las zonas de mayor y menor estabilidad. Una vez analizados los modelos anteriores se construirá diferentes mapas que enfoquen la distribución espacial de los resultados obtenidos en la zona de estudio.

El mapa geotécnico y de susceptibilidad realizado en este estudio otorgará nuevas medidas preventivas de seguridad para la explotación de canteras ubicadas en la zona de San Antonio de Pichincha. En el caso que la estabilidad de los taludes afecte a obras civiles se propuso algunas medidas de mitigación que permitirán establecer un mayor control de seguridad contra los fenómenos de remoción de masa.

Toda la información obtenida en este proyecto fortalecerá el inventario que aplica a la caracterización de macizos rocosos a nivel nacional, y a nivel internacional mostrará una diferente perspectiva al trabajar con el índice RQD.

Palabras clave: índice RQD, estabilidad, mineral de alteración, mapa geotécnico.

ABSTRACT

This project was executed in the area of San Antonio de Pichincha - Perucho, 12 km north of the city of Quito. The geological environment of the area is characterized by the presence of geological formations that are forming rock masses, pyroclastic flows, lagunal deposits, colluvial deposits and terraces. The different rock masses were evaluated through physical-mechanical parameters, by Bieniawski classification in 1973, which allowed to analyze the stability of the natural or artificial slopes.

The rock quality index (RQD) is one of the most important geomechanics parameters that were obtained in 1963 by Deere, which allowed to characterize the rock masses through the drill core, but Priest and Hudson in 1976 designed a surface method, where the relationship between the number of fissures on a specific space determine the value of this index. In recent years the RQD index has been modified through other factors that were present in the rock mass but were not considered. The current study proposed adjusting to the RQD index by means of alteration minerals that is considered a very important factor for the quality and stability of the slope.

In order to carry out this modification, the alteration of the minerals will be identified using micropetrographic analysis and X-ray diffraction tests. Once found the index of alteration proposed by Irfan and Dearman in 1978, this will provide a value that will proceed to make the correction to the RQD index.

With the new quality results, different geostatistical models will be constructed to identify the areas with the highest and lowest quality, as well as the areas of greatest and least stability. Analyzing the previous models, different maps will be constructed to indicate the spatial distribution of the results obtained in the study area.

The geotechnical and susceptibility map made in this study will provide new preventive safety measures for the exploitation of quarries located in the San Antonio de Pichincha area. In the event that the stability of the slopes possibly destroys civil works, some mitigation measures were proposed that will allow to establish a greater security control against the phenomena of mass removal.

All the information obtained in this project will strengthen the inventory that applies to the characterization of rock masses at a national level, and at the international level it will show a different perspective when working with the RQD index.

Keywords: RQD index, stability, alteration mineral, geotechnical map.

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Problema

La Parroquia de San Antonio de Pichincha, situada a 12 km al norte de la Ciudad de Quito, ha desarrollado gran cantidad de canteras estas últimas décadas, el material que se extrae es utilizado en diferentes áreas de construcción. Pero en los últimos años se ha convertido en una zona de alto riesgo por su deficiente explotación y mal uso del suelo, esto notificó la Secretaría de Gestión del Riesgo del Ecuador, (El Comercio, 2014).

Los problemas que se han generado por la mala práctica extractiva son: contaminación del aire, inestabilidad de taludes, aceleración de procesos erosivos, grandes cantidades de residuos urbanos e industriales, (Baca, 2012). También se pudo constatar que han existido algunos accidentes de gravedad del personal que trabaja en las canteras, por no tener el equipo, ni el conocimiento necesario para una extracción tecnificada del material.

La economía y desarrollo de los habitantes de la Parroquia de San Antonio, dependen del buen funcionamiento en sus labores de explotación, la segura funcionalidad de las estructuras de las canteras a cielo abierto y el buen uso de sus materiales, por lo cual se ha propuesto la realización de este proyecto.

El Ecuador no cuenta con suficiente información sobre las características y propiedades físico - mecánicas de los macizos rocosos, los cuales son considerados de gran importancia en el diseño y construcción de obras civiles, urbanas e industriales, que se cimentan sobre éstos materiales.

El objetivo del presente trabajo de titulación es realizar las clasificación geomecánica de los macizos rocosos, en los taludes de la zona de San Antonio de Pichincha y vías hacia la Parroquia de Perucho. Para ello, se utilizarán los sistemas de clasificación Rock Mass Rating (RMR), e Índice Q, donde se valorará fundamentalmente el Índice de Calidad de Roca (RQD – *Rock Quality Designation)* en los afloramientos de cada macizo rocoso, para una adecuada evaluación de estabilidad de los taludes. Se va a proponer una adaptación de éstos sistemas a una nueva perspectiva para la estabilidad de taludes ajustando el RQD en función de las características mineralógicas y del nivel de meteorización que presenten los macizos rocosos por estudiar. Por medio del ensayo de difracción de rayos X, y la descripción de láminas delgadas de roca obtendremos

resultados favorables de las fases mineralógicas correspondientes a estados de alteración, productos de la meteorización.

La geoestadística es una herramienta que ayudará en la visualización e interpretación de los datos obtenidos de las clasificaciones geomecánicas (RMR y Q) y el índice de calidad RQD, la cual ayuda a modelar adecuadamente la distribución espacial de los mismos.

La interpretación y el ajuste del factor RQD, promoverá la construcción de mapas temáticos como el mapa geotécnico, donde se podrá establecer diferentes zonas en función de la calidad geomecánica del macizo rocoso. Para posteriormente relacionando la información de otros mapas como el de pendientes, poder construir un mapa de susceptibilidad a movimientos en masa siendo un gran aporte para la comunidad científica y social.

Al culminar el presente estudio técnico, se podrá recomendar posibles medidas de mitigación, para garantizar la seguridad durante los procesos de construcción de los taludes, las autoridades del Distrito Metropolitano de Quito podrán tomar decisiones que se enfoquen en el bienestar de las personas y el ambiente.

Justificación

Justificación teórica

El diseño de los taludes es un factor muy importante para la ingeniería geológica, pues se encuentra presente en el conjunto de las actividades extractivas o constructivas. (González de Vallejo, 2002).

La posibilidad que ocurra un movimiento en masa comienza desde el momento de la formación de un talud natural o artificial y esto lleva a un análisis que involucra distintas disciplinas de Ciencias de la Tierra, del Medio Ambiente y Ciencias Naturales. (GEMMA, 2007).

El trabajo en la actualidad mostrará una iniciativa orientada a complementar y actualizar la evaluación de calidad geomecánica de macizos rocosos. Existen varios factores que afectan la estabilidad de taludes, de los cuales se pueden caracterizar para obtener valores que indicarán la calidad geotécnica del macizo. Pero esta caracterización puede fortalecerse a través de sugerencias, ajustes y análisis de cada factor.

En este trabajo se realizará el aporte a la clasificación geomecánica, a través de los minerales de alteración mediante el grado de meteorización, los cuales ayudaran ajustar los valores del índice de calidad de roca (RQD), para obtener los mejores resultados técnicos.

Justificación Metodológica

La metodología que se aplicará en este trabajo consta de herramientas geológicas, geotécnicas y geoestadísticas, apoyadas con información bibliográfica publicada, lo cual generará la evaluación de la calidad geomecánica y la estabilidad para los diferentes macizos rocosos. A nivel nacional no se han realizado muchos estudios para la estabilidad de taludes en roca. Esta evaluación consiste en una base de indicadores que podrán coadyuvar en una estimación preliminar de clasificación y evaluación de macizos rocosos.

A través de los análisis microscópicos y de Difracción de Rayos X, se puede identificar los minerales que se encuentran alterándose en cada macizo rocoso, en función de lo cual se designará un grado de meteorización. El índice de calidad de roca (RQD) podrá ser modificado mediante los resultados obtenidos en éstos análisis, contribuyendo a las clasificaciones geomecánicas.

El método geoestadístico se implementará para la realización de un mapa geotécnico, en el cual podremos visualizar la disposición de las pendientes naturales y la calidad del macizo rocoso, generando unidades geotécnicas en roca.

Todo lo mencionado anteriormente, suministrará actualizaciones en futuros trabajos de evaluación de estabilidad, y considerar una nueva perspectiva al trabajar con las clasificaciones geomecánicas.

Justificación Práctica

El establecimiento de poblaciones en lugares de alto riesgo ha ocurrido durante siglos. De igual forma las explotaciones no tecnificadas han provocado trabajos con alta vulnerabilidad, provocando la inestabilidad social y económica de las personas.

Los resultados motivarán a un adecuado ordenamiento territorial, además de incentivar la recopilación de información sobre las caracterizaciones geomecánicas (con ajustes mineralógicos y grado de meteorización) de los macizos rocosos. Por esta razón la

descripción del comportamiento mineralógico y físico-mecánico de los taludes en los sectores de San Antonio de Pichincha, y vías a Perucho, ayudarán a una adecuada preparación para el uso del suelo y mitigación de Fenómenos de Remoción en Masa (FRM).

Hipótesis

A través de este estudio se podrá ajustar mineralógicamente el índice de calidad de roca (RQD), mediante la designación de un grado de meteorización en función del estado de alteración de la matriz rocosa, obteniendo resultados menos conservadores en la clasificación geomecánica (RMR), de los afloramientos de macizos rocosos, por lo cual se podrá recomendar obras de mitigación más adecuadas a la problemática actual.

Objetivo General

Evaluar la estabilidad de los taludes naturales y modificados (explotación de canteras y aperturas de carreteras), en la zona de San Antonio de Pichincha, y vías a Perucho, mediante la caracterización geomecánica, mineralógica, modelos geoestadísticos en los macizos rocosos, la cual ayudará a la mitigación de los peligros por FRM.

Objetivos Específicos

- Estudiar y caracterizar las propiedades físico – mecánicas de los macizos rocosos, mediante trabajos en campo e información bibliográfica, para obtener los datos suficientes y aplicarlos a las medidas de mitigación.
- Recomendar este tipo de ajuste a la clasificación geomecánica, configurando el factor RQD a través de la mineralogía, en donde se tomará en cuenta los minerales alterados para dicha clasificación y las condiciones geológicas de las discontinuidades.
- Desarrollar un modelo geoestadístico considerando las diferentes condiciones geomecánicas de los taludes.
- Aportar información sobre los macizos rocosos, a través de este estudio, para aplicarlo en diferentes áreas rurales y urbanas del país.

- Generar un mapa geotécnico superficial y de pendientes para evaluar la estabilidad de los diferentes taludes del sector a ser estudiado.

Alcance

El presente estudio una vez realizado generará un ajuste para el índice RQD, reasignando un grado de meteorización en función de los minerales de alteración de la matriz rocosa. En consecuencia de lo anterior, se desarrollará un mapa geotécnico superficial que contribuirá con el municipio de la zona, también se desarrollará un mapa de susceptibilidad en base de lo previamente obtenido. Esto tiene el propósito de motivar a los demás científicos de la comunidad geotécnica a buscar nuevos factores de ajuste para la caracterización de un macizo rocoso in situ, es decir directamente en su lugar de afloramiento.

CAPÍTULO I: MARCO CONCEPTUAL

1.1 Localización

La zona donde se realizaron los levantamientos de la información necesaria, se encuentra entre las Canteras de San Antonio de Pichincha (Fucusucu, El Desierto, Manuel Espinoza, Tanlagua), en la Cantera Catequilla, en la Hacienda la Providencia, al Este de la Central Hidroeléctrica San Antonio de Pichincha, y vías hacia la Parroquia de Perucho. La zona de estudio cubre una superficie de 65 km^2.

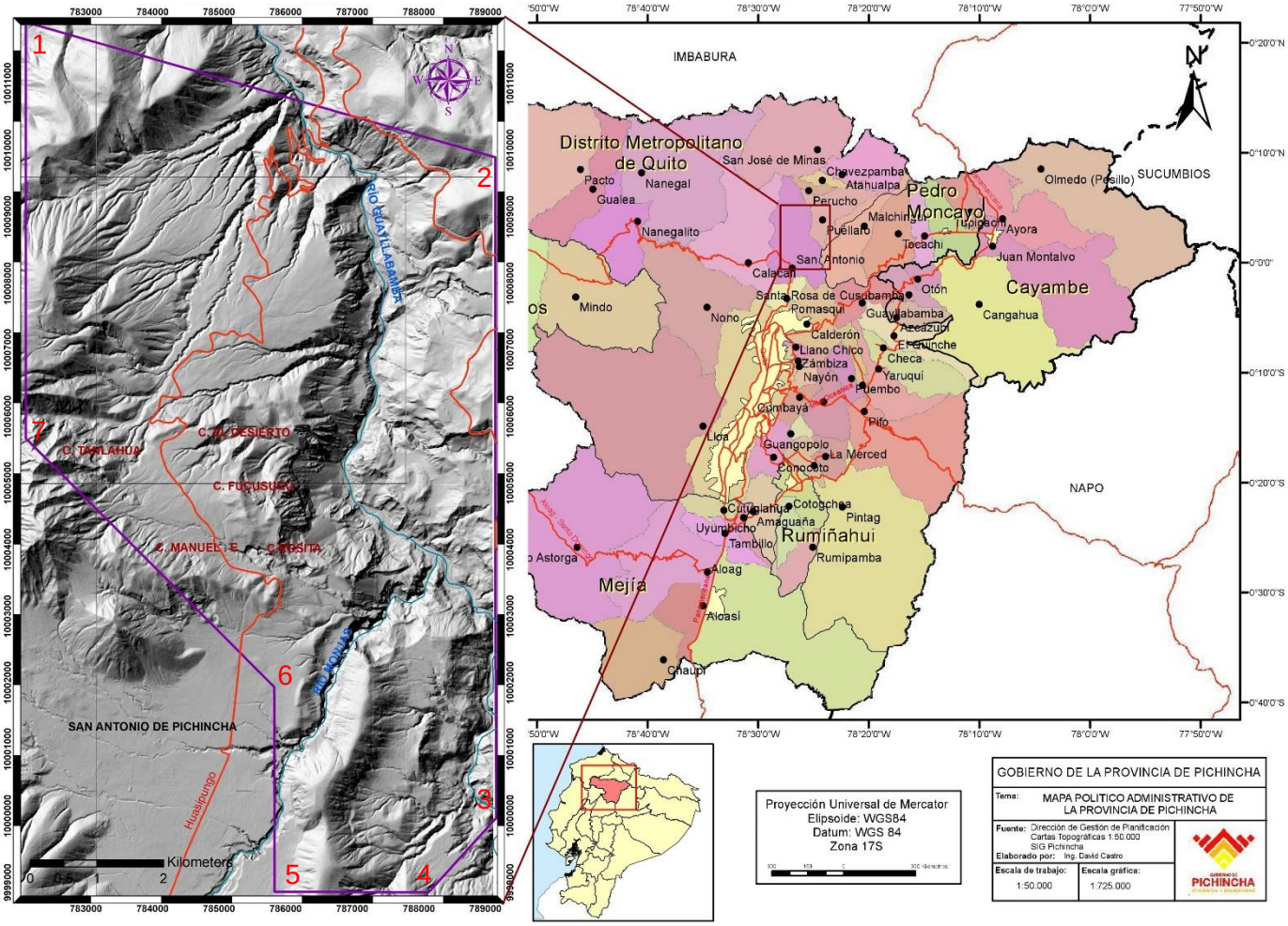

Figura 1. Localización de la zona estudio

El mapa esta georreferenciado en Datum Provisional de 1956 para América del Sur, zona17.

Tabla 1. Coordenadas UTM (Datum Provisional de 1956 para América del Sur) del área de estudio

1	X:781977,530164 ; Y:10011991,6648
2	X:788989,002521 ; Y:10009980,8274
3	X:789147,752838 ; Y:10000006,0158
4	X:788014,205426 ; Y:9998702,7475
5	X:785826,837018 ; Y:9998634,92212
6	X:785987,922288 ; Y:10001992,2783
7	X:782043,67613 ; Y:10005972,3819

1.1.2 Estudios Previos

Trabajos relacionados a la caracterización de macizos rocosos y estabilidad de taludes en la zona de Estudio: Caizaluisa y Criollo (2015), Almeida (2016), estos autores realizaron la caracterización geomecánica de macizos rocosos para el cierre y liquidación de las canteras ubicadas en la Parroquia de San Antonio de Pichincha, (Fucusucu y Cantera Blanca). Obteniendo el tipo de calidad de roca, la estabilidad de los macizos rocosos a través de la caracterización propuesta por Bieniawski en 1989 y el tipo de diseño de explotación para cada concesión.

Con respecto a la geología y tectonismo del lugar se consideró los trabajos realizados en la cuenca de San Antonio: Cornejo (1980), Villagómez (2002), Lavenu (1996), Pacheco (2013), Villagómez (2003), y Alvarado (2012). Estos trabajos muestran información geológica, geodinámica del Valle Interandino y sistemas de fallas activas a nivel regional. Proporcionan diferentes modelos de evolución tectónica y estratigráfica del Valle Interandino central incluyendo la zona de San Antonio de Pichincha.

1.2 Aspecto Socioeconómico

A través del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del GAD propuesto en la zona de San Antonio de Pichincha se identificó que ~37000 habitantes viven en la zona, de los cuales el ~28% de la población muestra un índice de pobreza medio (Censo INEC, 2010). La población económicamente activa de la Parroquia se encuentra en los sectores de Industrias manufactureras (18,11%), Comercio (16,62%) y transporte y almacenamiento (8,13%). Cuenta con una red pública de agua potable del 52% en la zona, un 67% de cobertura de alcantarillado y un ~79% de la población posee servicio eléctrico (GAD San Antonio de Pichincha, 2012).

1.2.1 Problemática de inestabilidad en canteras

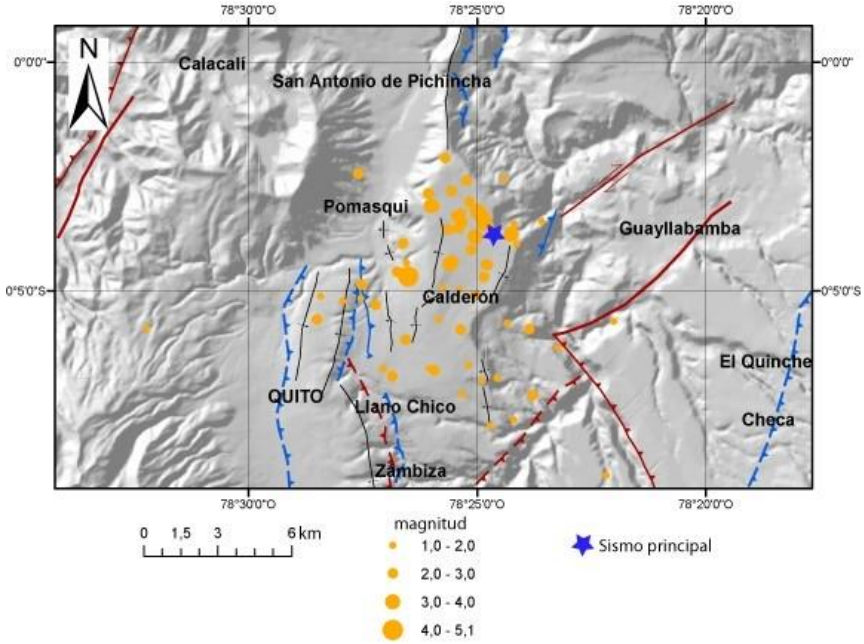

Figura 2. Localización de sismos (IGEPN, 2014)

En la “Figura 2” se observa los sismos que tuvieron lugar en Calderón el 12 de agosto del 2014, donde se pudo observar la vulnerabilidad de las diferentes canteras ubicadas en la Parroquia de San Antonio de Pichincha ya que la mayoría de las concesiones operaban ilegalmente y no utilizaban un diseño de explotación adecuado para extraer el material, por lo cual se generó deslizamientos, caída de roca, entre lo más importante. Con el objetivo de reducir la exposición de la población y trabajadores que participaban en la extracción del material, se tomaron medidas de seguridad que decreto la Secretaria de Gestión del Riesgo, por lo cual se cerraron 40 canteras, y después de algunos días se permitió la apertura de solo 7, porque muchas de estas no cumplían con las normas de explotación y seguridad. Las minas ilegales fueron cerradas, y la parroquia redujo de 41 puntos de explotación a 11 canteras legales, reduciendo considerablemente la contaminación y la vulnerabilidad contra Fenómenos de Remoción en Masa (El Comercio, 2014).

1.3 Aspecto físico

1.3.1 Geomorfología

Las formas del Valle Interandino se originaron por esfuerzos de extensión en dirección E-W en el Plioceno-Pleistoceno inferior, donde generó una gran cuenca y fue rellenada

por depósitos volcánicos primarios y secundarios, aluviales, lacustres y fluviales. Después un ambiente de compresión en dirección E-W en el Pleistoceno medio produjo levantamientos de tipo inverso, proporcionando el paisaje de la actualidad. Los ambientes volcánicos generados por la actividad del Volcán Casitahua, Pululahua, Mojanda-Fuya Fuya, han cubierto el terreno con diferentes productos volcánicos como macizos de lava, depósitos de flujos piróclásticos, rocas básicas, rocas intermedias, rocas ácidas, areniscas, depósitos lacustres y depósitos coluviales. (Villagómez, 2003). En la dirección sur de la zona de estudio, existen fallas ciegas de particularidad inversa producto de la prolongación de la Falla de Quito, las cuales modificaron la morfología del lugar, originando el levantamiento de la elevación Calderón- Catequilla hace 600 ka (Villagómez, 2003).

Los ríos son muy sensibles a cambios topográficos causados por levantamiento y subsidencia y son un ideal marcador para identificar actividad tectónica reciente (Burbank y Anderson, 2001). Según Alvarado, 2012 se puede identificar en la zona del río Guayllabamba frente a la vía Pisque- Puéllaro, se puede observar en la “Figura 3”.

La morfología del lugar se encuentra fuertemente erosionada por diferentes temperaturas templadas, vientos y precipitaciones durante todo el año, donde se ha originado la configuración del lugar, con fuertes pendientes cerca del río Guayllabamba.

1.3.2 Clima

El área de estudio se encuentra entre las alturas de 3050 msnm y 1750 msnm, lo que indica una zona climática Seca Temperada, la cual se ubica en la Sierra, esencialmente en los valles internos del Callejón Interandino. San Antonio registra una temperatura promedio anual entre 12 y 18 °C y precipitaciones inferiores a 500 mm anuales y superiores a 200 mm. El porcentaje de precipitaciones esta interpuesto por una época seca que comprende los meses de septiembre, agosto y julio, podría extenderse hasta noviembre dependiendo el sector. Los meses que no llueve varían entre 3 y 5. (Cañadas, 1983).

1.4 Geología de la zona

La descripción sobre las diferentes formaciones que se encontraron en el área de estudio, fueron recopiladas de informaciones bibliográficas de Villagómez, 2003, Pacheco, 2013, Andrade, 2012, Duque, 2000 y analizadas en base a los análisis obtenidos en láminas delgadas y Difracción de Rayos X.

1.4.1 Unidad Pallatanga (Santoniano)

Esta Unidad se encuentra formada por basaltos, micrograbos, areniscas volcánicas, escasas lavas en forma de almohadillas. Su edad no está muy bien definida, pero se ha justificado a través de la correlación con la Formación Piñon. La Unidad se interpreta como allóctana y posiblemente se trate de una secuencia ofiolítica incompleta y desmembrada (Léxico P.Duque, 2000).

1.4.2 Unidad Natividad (Campaniano – Masstrichtiano)

Se encuentra compuesta de rocas sedimentarias de secuencia marina, intercalados con cantidades menores de lava producto del contacto fallado con la Unidad Pallatanga y Río Cala. La Unidad está conformada principalmente por areniscas, cherts, y lutitas de color gris-verde y negro. Los sedimentos generalmente contienen granos de piroxenos, feldespatos detríticos y clastos de feldespato (Léxico P.Duque, 2000).

1.4.1 Formación Pisque (Plioceno)

La formación está definida en su parte inferior, como una serie de escorias, lavas, y brechas hacia el tope, con una afinidad basáltica. Su contacto inferior no ha sido definido. En la parte superior se puede encontrar potentes lahares estratificados, facies volcánicas primarias, flujos de lodo en bancos con intercalaciones de areniscas tobáceas, progradantes abanicos aluviales desde el oeste hacia el este, bancos métricos de areniscas fluviales, facies de abanicos aluviales con intercalaciones de sedimentos lacustres, en consecuencia son depósitos volcano-sedimentarios y volcanoclásticos.(Villagómez, 2003).

Tomando como referencia el actual estudio de la zona, se consideró los dos miembros que presenta esta Formación.

1.4.1.1 Miembros Inferiores

Aquí se puede apreciar taludes sub-verticales, macizos rocosos de color marrón verdoso, donde existe gran cantidad de familias de discontinuidades, también se encuentran fuertemente oxidadas (Pacheco, 2013). Las muestras presentan una capa oxidada en el exterior, interiormente muestran cristales de plagioclasas menores a 4 mm. Presenta poca matriz posiblemente óxidos, plagioclasas alteradas (Anexo 3.3). Se define como un basalto porfirítico, a través de la realización de láminas delgadas y difracción de rayos X. La edad de estos basaltos según Pacheco 2013, datan del Pleistoceno, esto sé obtuvo del análisis de K-Ar, pero debería ser definida mediante otro medio de datación que se adapte mejor al ambiente. Suprayacente a estos

afloramientos de basaltos porfiríticos se encuentran depósitos volcanoclásticos, sedimentos volcánicos, flujos de lodo y aluviales (Villagómez, 2013). En sus estructuras indican fallamientos post depositacionales, diaclasas tipo columnar e intercalaciones con depósitos fluvio – lacustre, y brechas volcánicas.

1.4.1.2 Miembros Superiores

Están agrupados dentro de un grupo que conforma los domos de Pacpo, Catequilla, flujos de lava que afloran entre los domos y secuencias de brechas volcánicas, todo lo mencionado anteriormente está ligado con una misma serie magmática que conecta también al volcán Casitahua. (Pacheco, 2013). El domo Catequilla está formado por lavas de composición intermedias, porfirítica de grano medio, de color gris azulada. Presenta cristales menores a 3,5 mm, también se observa anfíboles siendo reemplazados por óxidos (Anexo 3.3), este se encuentra intruyendo a volcano-sedimentos y brechas volcánicas del miembro inferior. Se encuentra subyaciendo a depósitos fluvio-lacustres en discordancia angular, perteneciente a la Formación San Miguel.

1.4.2 Formación San Miguel (Pleistoceno Inferior)

Está conformada principalmente de areniscas líticas de tamaño métrico a decimétrico, de un color gris-verde, alternado con tobas primarias, limolitas tobáceas y tobas retrabajadas. En su parte superior la secuencia aumenta su tamaño de grano donde aparecen areniscas, que contienen concreciones oxidadas y clastos de andesita y pómez. Su ambiente donde se depositó da lugar a ambientes fluviales, lacustres y deltaicos. También está presenta arcillolitas, tobas de afinidad ácida con tamaños decimétricos. La presencia de yeso y limonita tanto en fracturas como planos de estratificación. (Villagómez, 2003)

1.4.3 Formación Mojanda –Fuya Fuya (Pleistoceno Medio)

El Complejo volcánico Mojanda-Fuya Fuya comprende de dos sistemas volcánicos, Mojanda y Fuya Fuya. El más antiguo es el volcán Mojanda fue construido por andesitas y andesitas que contienen gran cantidad de sílice (Mojanda Inferior). Este edificio fue cubierto por un cono de composición andesita basáltica (Mojanda Superior). El Fuya Fuya inferior aparece por una extrusión de lava andesítica rica en Si y domos de carácter dacítico, y la secuencia de flujos piroclásticos que incluye dos capas voluminosas riolíticas. Después la edificación de San Bartolo de composición andesítica la cual representa una fase intermedia del volcán Fuya Fuya, la construcción se detuvo por un colapso en la época del Pleistoceno. Y por último la formación del volcánico Superior

Fuya Fuya se generó por un emplazamiento de lavas silíceas y domos dentro de la avalancha. (Robin, 2009)

1.4.4 Formación Cangahua (Pleistoceno Superior)

Está constituida de tobas alteradas alternado con caídas de ceniza, paleosuelos, pómez, canales aluviales y a veces flujos de lodo. Presenta una textura arena-limosa. Pocas veces se observa estratificada en superficies planas y de forma periclinal en superficies con algún grado de pendiente. (Villagómez, 2003).

Usualmente se encuentra constituida por paquetes de limos – arenas, poseen un buen sorteo. Su matriz está compuesta de ceniza vítrea, oxidada y alterada, con cristales disipados de anfíboles, plagioclasas y piroxenos. Como accesorios presenta biotita y magnetita y cuarzo se muestra en las trazas. (Pacheco, 2013)

1.4.5 Formación Pululahua (Holoceno)

El complejo volcánico Pululahua se caracteriza por la formación de dos grupos de domos de lava desde la época del pre-Holoceno. Y durante el Holoceno la actividad eruptiva presento dos fases, la primera fase fue una continua explosiva erupción que formo el cráter; la segunda fase dio lugar a la formación de domos de lava en el interior del cráter. Las lavas del complejo volcánico Pululahua son clasificadas como andesitas ácidas a dacitas (Andrade et al., 2012).

Daniel Pacheco 2013, subdivide esta formación en miembros de brechas dacíticas, lacustres no deformados y piroclásticos del Pululahua.

1.4.6 Depósitos Holocénicos

Existen terrazas de tipo fluvio-lacustre en el interior de la depresión Guayllabamba, formadas en por lo menos cuatro diferentes horizontes. Se observa depósitos donde aparecen limos y arenas con intercalaciones de ceniza. Se desconoce la fuente de la ceniza que se encontró en cada depósito (Villagómez, 2003). También aquí podemos encontrar depósitos coluviales y depósitos lacustres, compuestos por cenizas intercaladas con lignito (Cornejo, 1980).

1.4.7 Mapa Geológico de la zona

A continuación se muestra el mapa geológico del área de estudio, recopilado de la Misión Británica y la dirección de Geología y Minas, 1979-80.

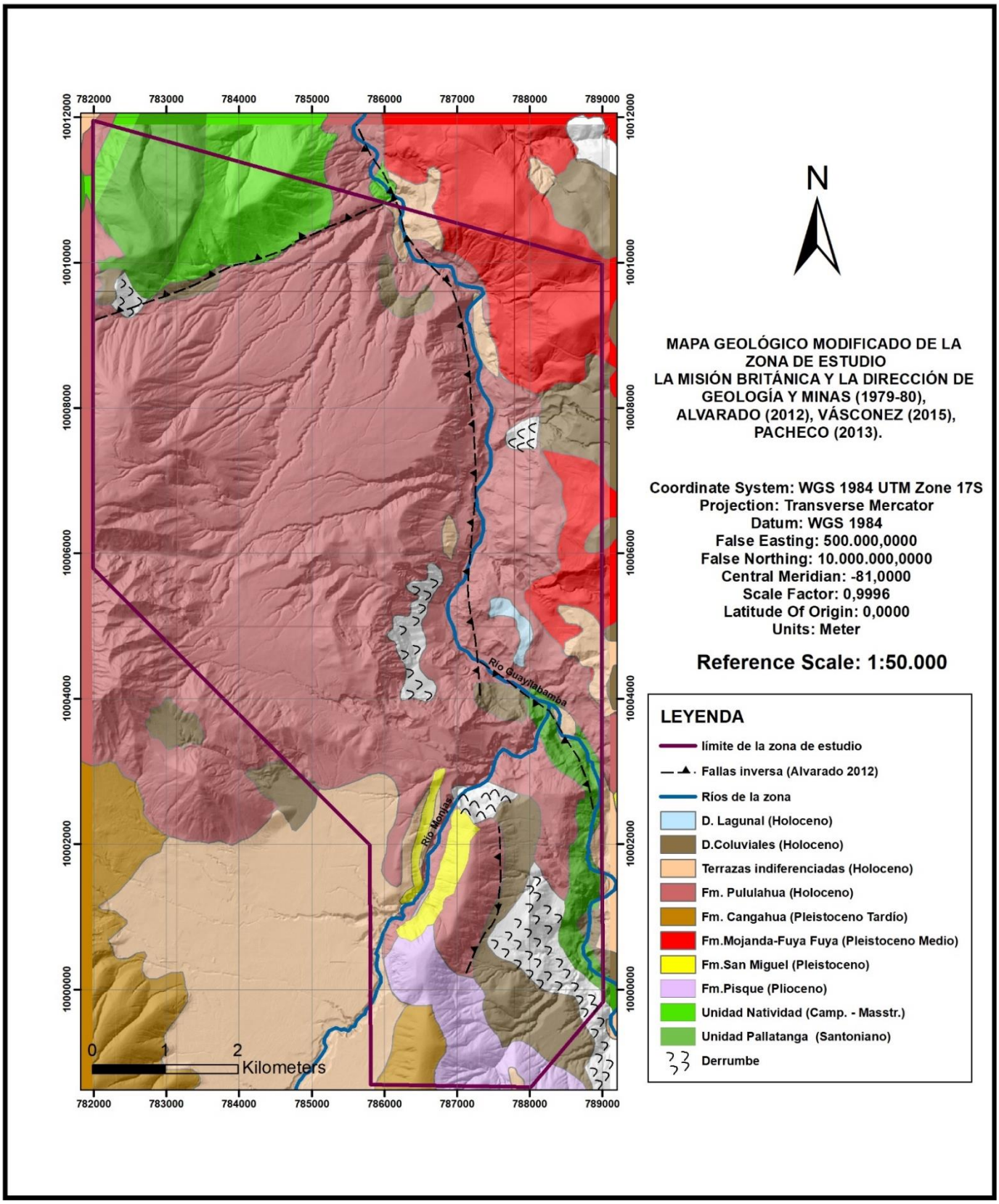

Figura 3. Mapa Geológico modificado de la Misión Británica (1979-80)

La “Figura 3” exhibe un mapa geológico que fue modificado con actual información de la zona, los siguientes autores (Alvarado, 2012., Vásconez, 2015., y Pacheco, 2013) contribuyeron con la actualización de la información.

1.5 Conceptos Generales

1.5.1 Taludes en roca

Un talud se considera como fracciones de rocas en la base de paredes de macizos rocosos, en el caso de ingeniería se considera como una pendiente con una inclinación específica que mantenga la estabilidad de la zona (González de Vallejo, 2002). Las estructuras que muestran las rocas muchas veces presentan anisotropía originadas por discontinuidades, y plegamientos, por lo cual su comportamiento mecánico debe ser evaluado con mucho criterio y detalle. Los taludes naturales y los excavados en roca sufren inestabilidades debido a agentes erosivos y configuraciones geométricas. Otros factores que también desestabilizan su estructura son la sismicidad natural y voladuras con explosivos (Luis Blázquez, 2000).

1.5.2 Mecánica de Rocas

Es la disciplina que se ocupa del estudio práctico y teórico a través de las propiedades y comportamientos mecánicos de los macizos rocosos, y la respuesta frente a la acción de fuerzas aplicadas en su ambiente físico.
Se desarrolló gracias a la combinación de la geología en obras superficiales, subterráneas y explotaciones.
La intención de la mecánica de rocas es reconocer y pronosticar el comportamiento de los materiales rocosos ante la actuación de fuerzas internas y externas que actúan sobre ellas. (González de Vallejo, 2002).

Los factores geológicos que predominan en la conducta y las propiedades mecánicas de los materiales rocosos son:

- Estructuras geológicas y discontinuidades
- La litología y propiedades de la matriz
- El estado de esfuerzos al que se encuentra sometido el material
- El ambiente hidrológico
- El grado de alteración

1.5.3 Índice RMR o clasificación Geomecánica

Desarrollado por Bieniawski en 1973, este sistema permite la clasificación de macizos rocosos donde se puede relacionar los índices de calidad del macizo con medidas geotécnicas. El RMR (Rock Mass Rating) también llamado clasificación geomecánica, se aplica en zonas que muestren características geológicas casi homogéneas, en donde se efectúa el levantamiento de datos mediante diferentes métodos. El índice de calidad

RMR varía de 0 a 100, esto permite identificar la calidad de cada macizo, permitiendo conocer los parámetros de resistencia y deformabilidad. (Luis Blázquez, 2000).

Las diferentes características de los macizos rocosos que se valoran en las diferentes clasificaciones son:

-Resistencia del material
-Orientación de las discontinuidades
-RQD, (índice de calidad de roca)
-Espacio entre discontinuidades
-Estado de las discontinuidades
-Estructuras
-Presencia del agua

Tabla 2. Parámetros del índice RMR (Bieniawski, 1989)

PARÁMETROS		CARACTERÍSTICAS	PUNTAJE
RQD		90-100%	**20**
		75-90%	**17**
		50-75%	**13**
		25-50%	**6**
		<25%	**3**
Separación entre diaclasas		>2m	**20**
		0.6 - 2m	**15**
		0.2 -0.6 m	**10**
		0.06 - 0.2 m	**8**
		< 0.06m	**5**
Condiciones de Discontinuidad	Longitud de discontinuidad	<1m	**6**
		1 - 3 m	**4**
		3 - 10 m	**2**
		10 - 20 m	**1**
		>20 m	**0**
	Abertura	Nada	**6**
		<0.1 mm	**5**
		0.1 - 1 mm	**3**
		1- 5 mm	**1**
		>5mm	**0**
	Rugosidad	Muy rugosa	**6**
		Rugosa	**5**
		Ligeramente Rugosa	**3**
		Ondulada	**1**
		Suave	**0**
	Relleno **(A)**	Ninguno	**6**
		Relleno duro <5mm	**4**
		Relleno duro > 5 mm	**2**
		Relleno blando <5mm	**2**
		Relleno blando >5mm	**0**
	Alteración	Inalterada	**6**
		Ligeramente alterada	**5**
		Moderadamente alterado	**3**
		Muy alterado	**1**
		Descompuesto	**0**

Agua Freática		Seco	15
		Ligeramente húmedo	10
		Húmedo	7
		Goteando	4
		Agua Fluyendo	0
Resistencia de la matriz Rocosa (Mpa)	Compresión Simple (Mpa)	>250	15
		250-100	12
		100-50	7
		50-25	4
		25-5	2
		5-1	1
		<1	0
	Ensayo de Carga puntual (Mpa)	>10	15
		10 - 4	12
		4 - 2	7
		2-1	4

En la "Tabla 2" se puede observar todos los parámetros que se debe tomar en cuenta para realizar la clasificación geomecánica del macizo rocoso.

1.5.4 Resistencia a la compresión simple

La conducta mecánica de las rocas está determinado por la resistencia y la deformabilidad. La resistencia es el esfuerzo que soporta la roca para determinadas deformaciones.

También llamada resistencia uniaxial es el máximo esfuerzo que puede tolerar la roca al ser sometida a compresión uniaxial, determinada en el laboratorio en una probeta cilíndrica sin confinar, (Diana Calderón, 2014), el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\sigma c = \frac{Fc}{A}$$

Ecuación 1.

σ_c = compresión simple

F_c= Fuerza compresiva aplicada

A= Área donde se aplicó la fuerza

1.5.5 Martillo de Schmidt

Este martillo fue construido con la idea de estimar la resistencia a compresión simple del concreto, pero luego fue modificado por lo cual se pudo estimar la resistencia a compresión simple de la roca (RCS) (Lozano, 2009).

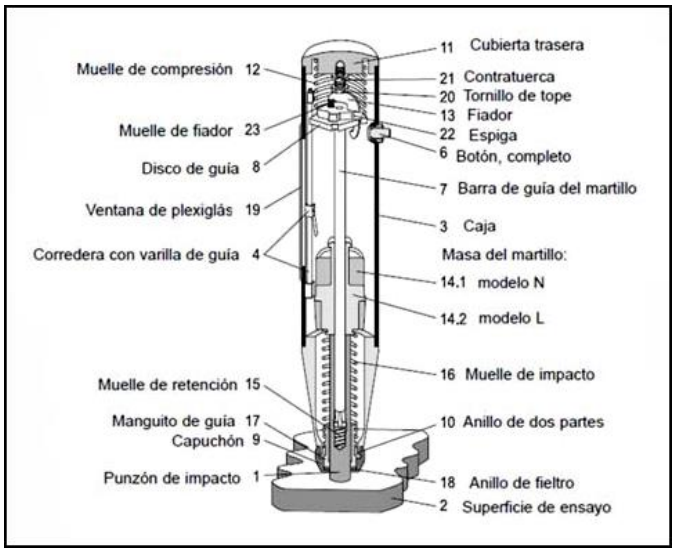

Figura 4. Estructura del Martillo Schmidt

1.5.6 Ensayo de carga puntual

Se utiliza para determinar la resistencia a la compresión simple de fragmentos de rocas, bloques, a partir del índice de resistencia a la carga puntual (I_s), de tal manera que el esfuerzo aplicado se convierte a valores aproximados a RCS, según el tamaño de la muestra (Vallejo de González, 2002).

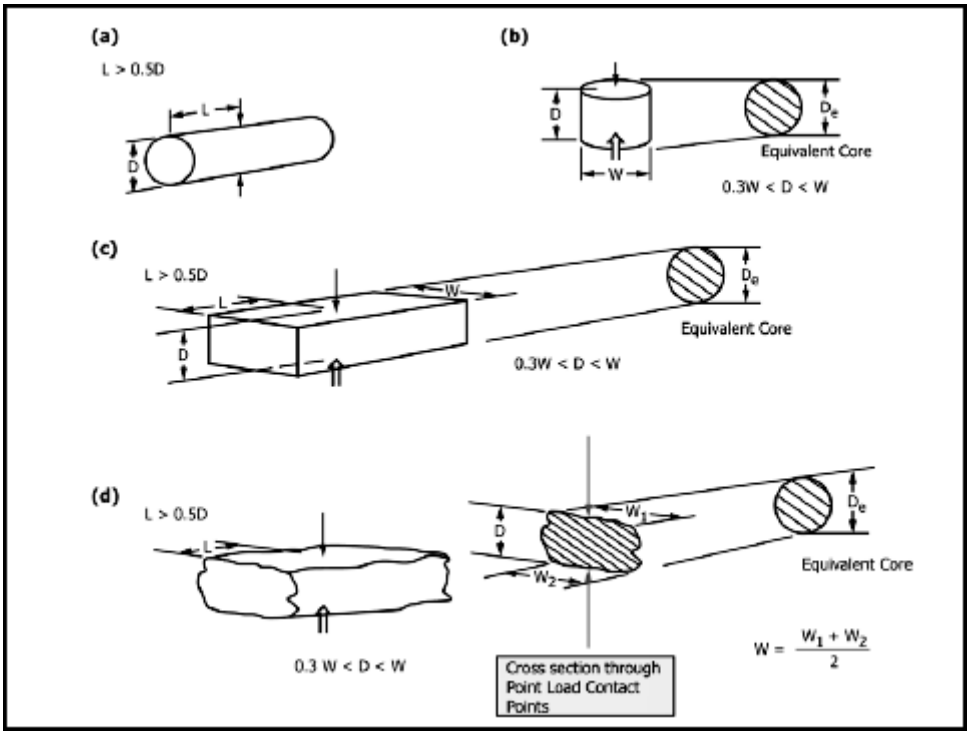

Figura 5. Dimensiones de la muestra (ASTM D5731, 2016)

En la “Figura 5” se observa la configuración de carga y requerimientos en la forma de los testigos (a) muestra diametral, (b) muestra axial, (c) bloque y (d) muestra irregular. L=largo, W = ancho, D= diámetro y De = diámetro del núcleo equivalente.

El índice de carga puntual sin corrección se obtiene de la siguiente forma:

$$Is = P/De^2 \text{ (Mpa)}$$

Ecuación 2. (ASTM D5731, 2016)

Donde:

P = carga de falla (N)

De = diámetro de núcleo equivalente

1.5.7. RQD

El índice de calidad de roca desarrollado entre 1963 y 1967 por Deere, donde se calcula con el porcentaje de recuperación de testigos mayores a 10 centímetros de longitud del proceso de perforación, con respecto a la longitud total.

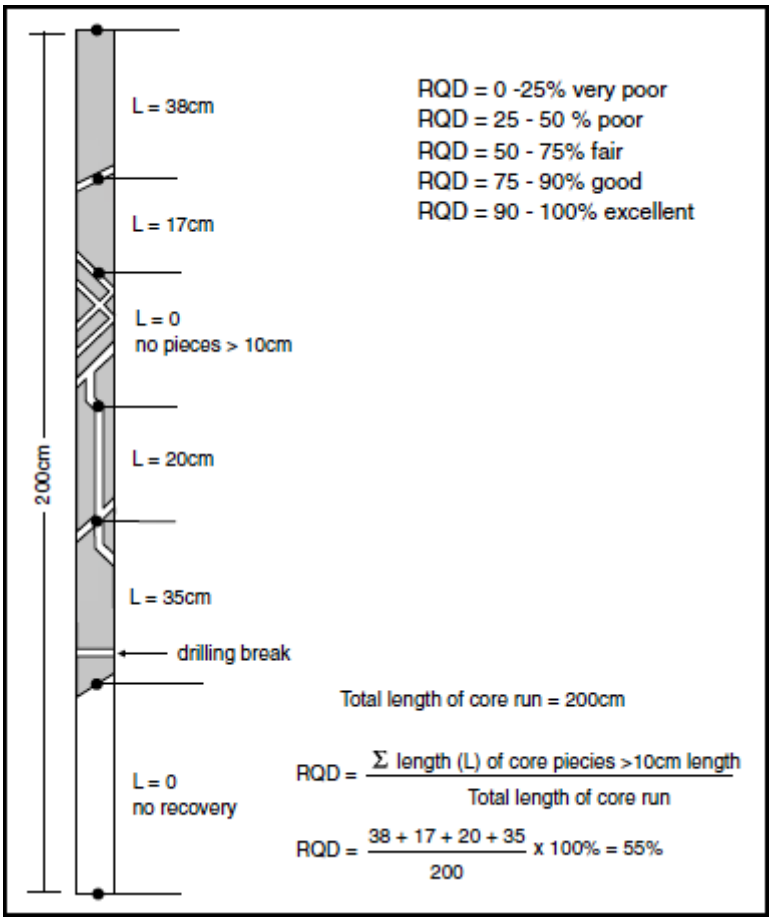

Figura 6. RQD para testigos de perforación (Palmstrom, 2005)

La segunda forma de obtener el índice RQD fue propuesta por Hudson y Priest (1976) donde presentan la siguiente ecuación matemática que se relaciona al RQD con la frecuencia de fracturas, comprende el número de fisuras por metro, en una designada línea de exploración.

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

Donde λ = Número de fisuras/ Espacio (m)

La tercera forma de obtener el índice RQD es mediante el cálculo de Jv (definido como el número de discontinuidades que intersecan un volumen de 1 m^3).

$Jv = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 + \ldots\ldots 1/S_n + Nr/(5\sqrt{A})$

Donde (S_n), es el promedio de espaciamiento para el conjunto de discontinuidades, (Nr) es número de discontinuidades aleatorias, (A) es el área en m^2.

Palmstrom en 1974 propuso la siguiente relación entre el RQD y Jv.
RQD =115 – 3,3 Jv

1.5.8 Orientación

Queda definida en el espacio por su dirección de buzamiento y por su buzamiento. La medida se realiza mediante una brújula con clinómetro. La dirección de buzamiento se obtiene mediante la dirección de las agujas del reloj desde el norte, y varía entre 0° a 360°, en un plano horizontal. Y el buzamiento se obtiene según la inclinación de la pendiente que varía de 0° a 90° que interseca el plano horizontal.

1.5.9 Espaciado

Está definido como la distancia que existe entre dos planos de discontinuidad de la misma familia, y se mide en forma perpendicular a mencionados planos. Este valor indica el espaciado medio de los valores medidos de las discontinuidades de una misma familia.

El espaciado condiciona el tamaño de cada bloque, por lo cual mostrará el comportamiento mecánico del macizo rocoso (Hudson, 2000).

1.5.10 Continuidad

Es la prolongación superficial, cuya longitud se mide según la dirección y buzamiento del plano. Es importante observar las familias de discontinuidad que poseen más

extensión ya que condicionan los planos de rotura del macizo. Se mide a través de una cinta métrica la extensión de la discontinuidad (González de Vallejo, 2002).

1.5.11 Rugosidad

Evalúa la resistencia al corte de planos, y se puede medir a partir de datos empíricos en el campo, también con ensayos de corte directo. La rugosidad permite una mayor resistencia al corte, y disminuye cuando aumenta la abertura y relleno.

Existen diferentes horizontes de rugosidad, los cuales permite a los planos de discontinuidad presentar mayor resistencia al corte, por lo cual se presentó los siguientes perfiles (Hudson, 2000).

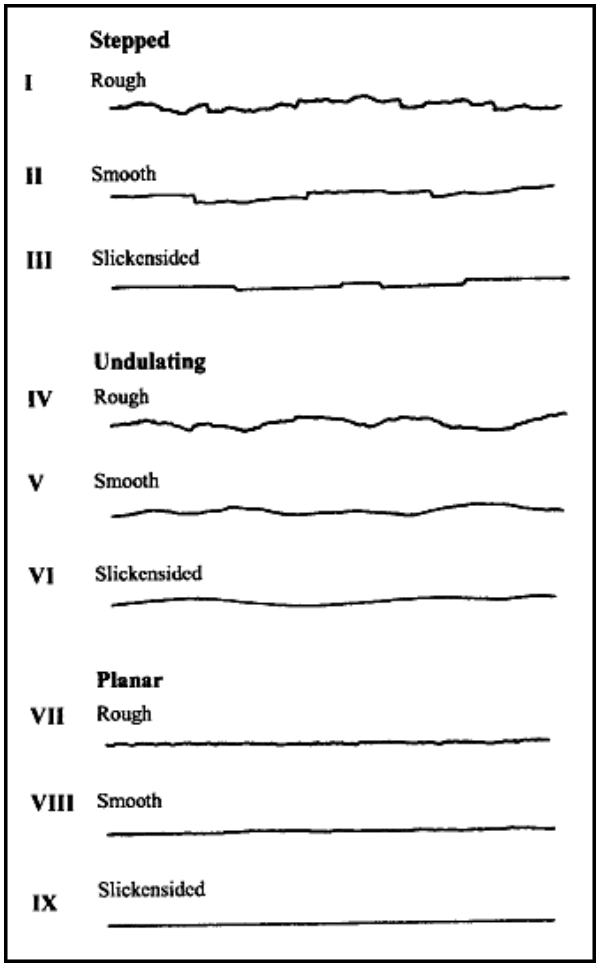

Figura 7. Perfiles de Rugosidad (Hoek, 1981)

1.5.12 Abertura

Es la distancia que separa las paredes de una discontinuidad, la medida se realiza de forma perpendicular. Dentro de las aberturas se puede encontrar relleno de otro material o del mismo macizo. La abertura disminuye a mayor profundidad y se mide a través de una regla graduada con milímetros. La abertura según su tamaño permitirá mayor o menor resistencia al corte de la discontinuidad (Hudson, 2000).

1.5.13 Relleno

El relleno aparece entre los planos de discontinuidad, puede ser de la misma roca o de diferente material, el tamaño también varía según la composición. La presencia del relleno controla el comportamiento de la discontinuidad. La peculiaridad principal del relleno debería ser descrita para poder interpretar su conducta en diferentes condiciones (Hudson, 2000).

1.5.14 Agua freática

Se refiere a la presencia del agua dentro del macizo rocoso, la cual también controla la estabilidad del talud a través de las diferentes fuerzas que ejerce contra las paredes de las discontinuidades, quitando el material a su paso. Muchas veces el agua puede estar acompañado de minerales que precipitan en su trayectoria, por lo cual podría desestabilizar el macizo por las diferentes propiedades que el mineral presente.

A continuación se presenta un gráfico explicativo, resumiendo todos los conceptos anteriores.

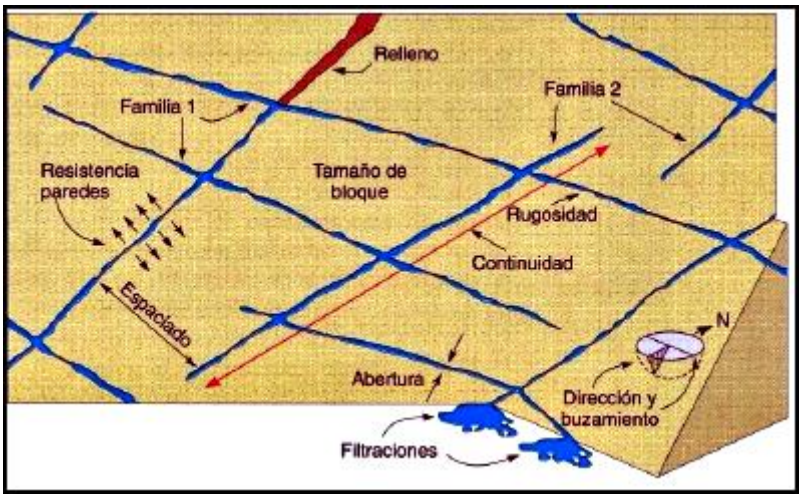

Figura 8. Resumen de parámetros del RMR (Hudson, 1989)

1.5.15 Alteración

Se observa la cantidad de minerales que se encuentran destruyéndose, la meteorización química reemplaza el mineral original por otro que contiene diferentes propiedades, ya sea que se encuentre expuesto al ambiente o por la circulación de soluciones hidrotermales que alteran los minerales a su paso (Hudson, 2000).

1.6 Clasificación SMR

El SMR (Slope Mass Rating) permite la evaluación empírica de la estabilidad de una excavación. Es aplicado a taludes, donde el valor del SMR se obtiene a partir del RMR y de factores aplicados a la orientación de las discontinuidades y el método de excavación, (Luis Blázquez, 2000).

Tabla 3. Índice SMR (Romana, 1997)

Clasificación Geomecánica de Taludes SMR						
Factores de ajuste por la orientación de las juntas (F1, F2, F3)						
Caso		Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
P T	|αj - αs| |αj - αs-180°|	>30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
P y T	F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1
P	|βj|	<20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	>45°
	F2	0,15	0,4	0,7	0,85	1
T	F2	1	1	1	1	1
P T	βj - βs βj + βs	> 10° <110°	10° - 0° 110° - 120°	0° >120°	0 - (-10°) ---	< -10° ---
P y T	F3	0	-6	-25	-50	-60
Factor de ajuste por el método de excavación (F4)						
Método	Talud natural	Precorte	Voladura Suave	Excavación Mecánica	Voladura Deficiente	
F4	+15	+10	+8	0	-8	
P: Rotura plana αj: dirección de las juntas αs : Dirección del talud T: rotura por vuelco βj: buzamiento de las juntas βs: buzamiento del talud						

1.6.1 Factores

F1, dependerá del paralelismo entre la dirección de las discontinuidades y el plano del talud.

F2, dependerá del buzamiento de la discontinuidad que origine mayor inestabilidad al talud, en el caso de rotura por vuelco su valor será igual a 1.

F3, indica la relación entre los buzamientos de la discontinuidad y el talud.

F4, el factor que depende del método de excavación.

$$SMR = RMR + (F1 x F2 x F3) + F4$$

Ecuación 3.

1.6.2 Tipos de Rotura que generan FRM

Rotura plana

Esta rotura se produce por un plano o superficie preexistente, y por donde se producirá el corte a lo largo de dicho plano. Las condiciones desfavorables es encontrar discontinuidades con buzamientos a favor del talud y una misma orientación. Este tipo de roturas es típico en afloramientos lutíticos, pizarrosos, generándose la rotura a favor de esquistosidad.

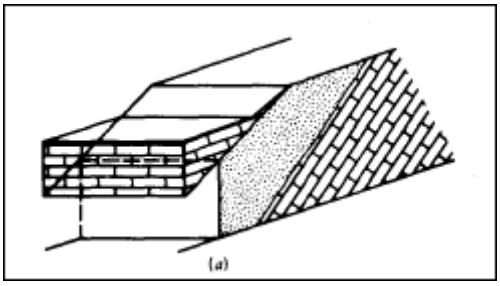

Figura 9. Esquema de rotura plana (Goodman, 1989)

Figura 10. Rotura plana, afloramiento lutítico cerca del río Guayllabamba
UTM: (X: 0788806, Y: 10001812)

Rotura por vuelco

Este tipo de rotura se origina en taludes rocosos donde las capas presentan buzamiento contrario a la pendiente del talud y una orientación paralela al mismo. Implica un movimiento de rotación de bloques que se encuentran a favor de discontinuidades perpendiculares entre sí.

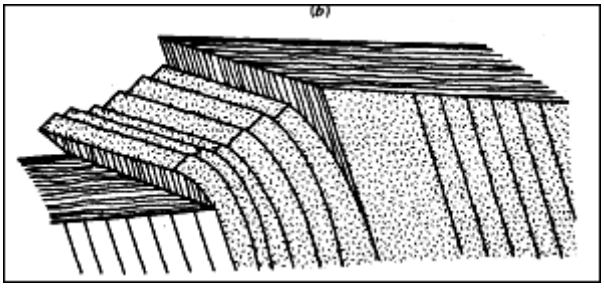

Figura 11. Esquema de rotura por vuelco (Goodman, 1989)

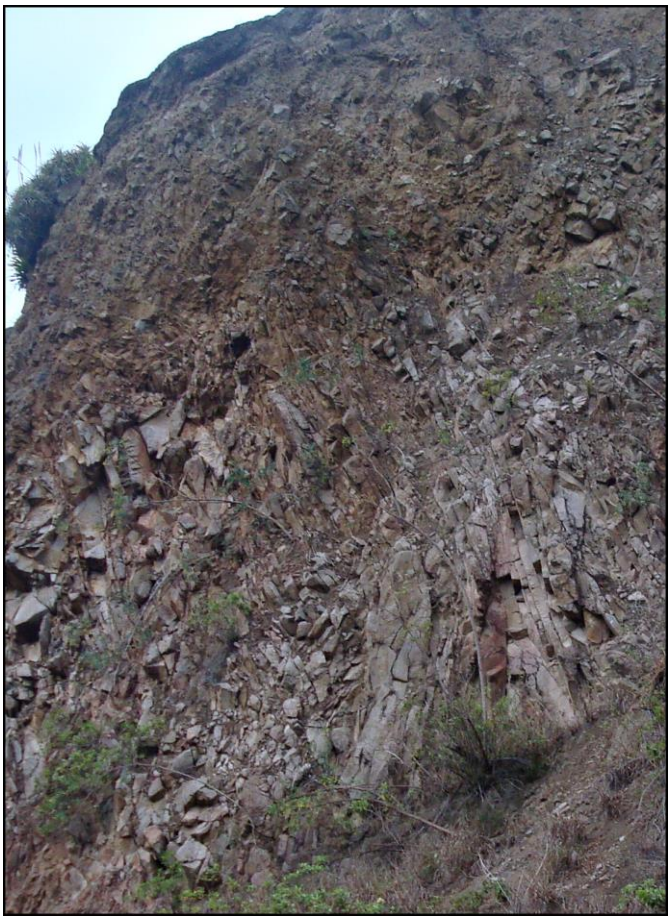

Figura 12. Rotura por vuelco, vía Puéllaro – Perucho

UTM: (X: 0788827 Y: 10008801)

1.7 Índice Q

Desarrollado por Barton, Lien y Lunde en 1974, constituye un sistema de clasificación de macizos rocosos y proporciona parámetros geotécnicos, proyectando soportes para túneles.

Este índice se encuentra relacionado con los siguientes factores.

$$Q = \frac{RQD}{Jn} x \frac{Jr}{Ja} x \frac{Jw}{SRF}$$

Ecuación 4.

Donde:

RQD: índice de calidad de roca

Jn: grado de fracturación

Jr: grado de rugosidad

Ja: grado de alteración

Jw: factor de reducción por presencia de agua

SRF: (factor de reducción de esfuerzo), es un coeficiente que tiene en cuenta la influencia del estado tensional del macizo rocoso. En este caso daremos importancia a las tensiones cerca de la superficie.

1.7.1 Índice Q-slope

Este método fue desarrollado para permitir a la ingeniería civil y geotécnica, poder mantener la estabilidad de las pendientes generadas en rocas excavadas y hacer potenciales ajustes a sus ángulos, asegurando la estabilidad de los macizos rocos durante su construcción o explotación.

El Q-slope fue presentado por Barton y Bar 2015 para caracterizar rocas expuestas, a través de la modificación del sistema Q (Barton, 1974),. El Q-slope propone realizar un ajuste a la resistencia que existe entre bloques de un macizo rocoso mediante el factor de orientación de la discontinuidad.

Tabla 4. Factor de orientación de discontinuidad.

Factor de orientación de discontinuidad Fo		
O-descripción del factor	**JA**	**JB**
Muy favorable orientación	2	1,5
Bastante favorable	1	1
No favorable	0,75	0,9
Muy no favorable	0,5	0,8
Causando falla	0,25	0,5

El Q-slope está intentando mantener seguro los taludes naturales, cortes de vías o bancos individuales por medio del ángulo de pendiente, pero no intenta evaluar la estabilidad.

La ecuación que utiliza es la misma de la “Ecuación 4”, pero modifica los dos últimos parámetros y ajusta el valor de (Jr/Ja) (esta relación indica la resistencia entre bloques), a través de una puntuación dada a la orientación de las discontinuidades (Barton & Bar, 2015)

$$Q - slope = \frac{RQD}{Jn} x \left(\frac{Jr}{Ja}\right) x(Fo) x \frac{Jwice}{SRFslope}$$

Ecuación 5.

A continuación se detalla los cambios para esta ecuación.

La relación (Jr/Ja) es ajustada por medio del factor de orientación (Fo), con los diferentes valores presentados en la “Tabla 4”, para una discontinuidad (JA) o para dos familias de discontinuidad (JB).

Jwice = proporcionado por el ambiente y condición geológica de la zona.
SRF-slope = en este caso se obtiene de las condiciones físicas del talud.

1.8 Variograma

El variograma será utilizado para interpretar e interpolar los datos en el espacio a través de un análisis variográfico que propone esta herramienta geoestadística

El variograma es una herramienta básica de la Geoestadística. Permite cuantificar los parámetros geológicos y analizar el comportamiento espacial entre los valores muestreados (Tulcanaza, 1992).

Características de un Variograma

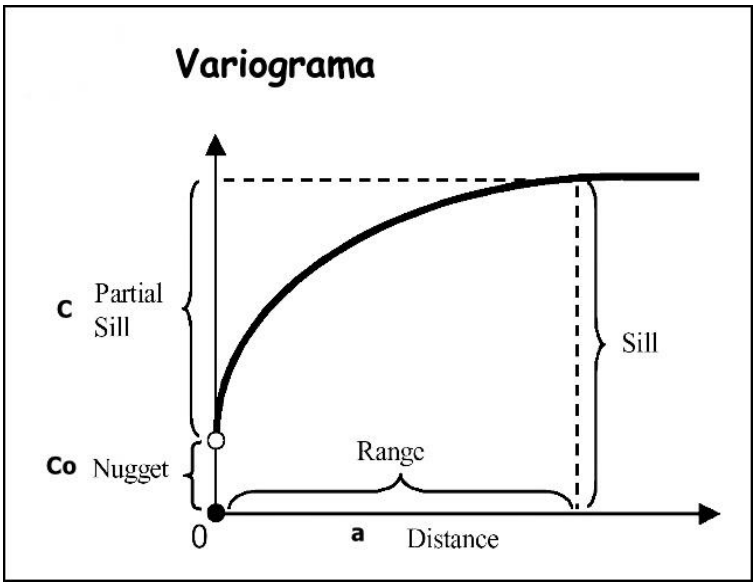

Figura 14. Diagrama de un Variograma (Cabral, 2015)

En la “Figura 14” se puede identificar lo siguiente:
El Sill, es el valor constante en un variograma cuando las distancias son mayores al rango.
El rango (h) es aquella distancia donde el variograma se estabiliza y alcanza al Sill.
El efecto pepita (nugget), está identificado por C_0, el valor es el resultado de la trayectoria del variograma hasta cortar el eje vertical, este efecto incrementa la varianza total del variograma. El alcance (a) determina una medida de la zona donde se relaciona la distancia h entre las muestras, considerando si la distancia es menor al rango las muestras se correlacionan entre sí, pero si es mayor no (IMACGL, 2000).

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

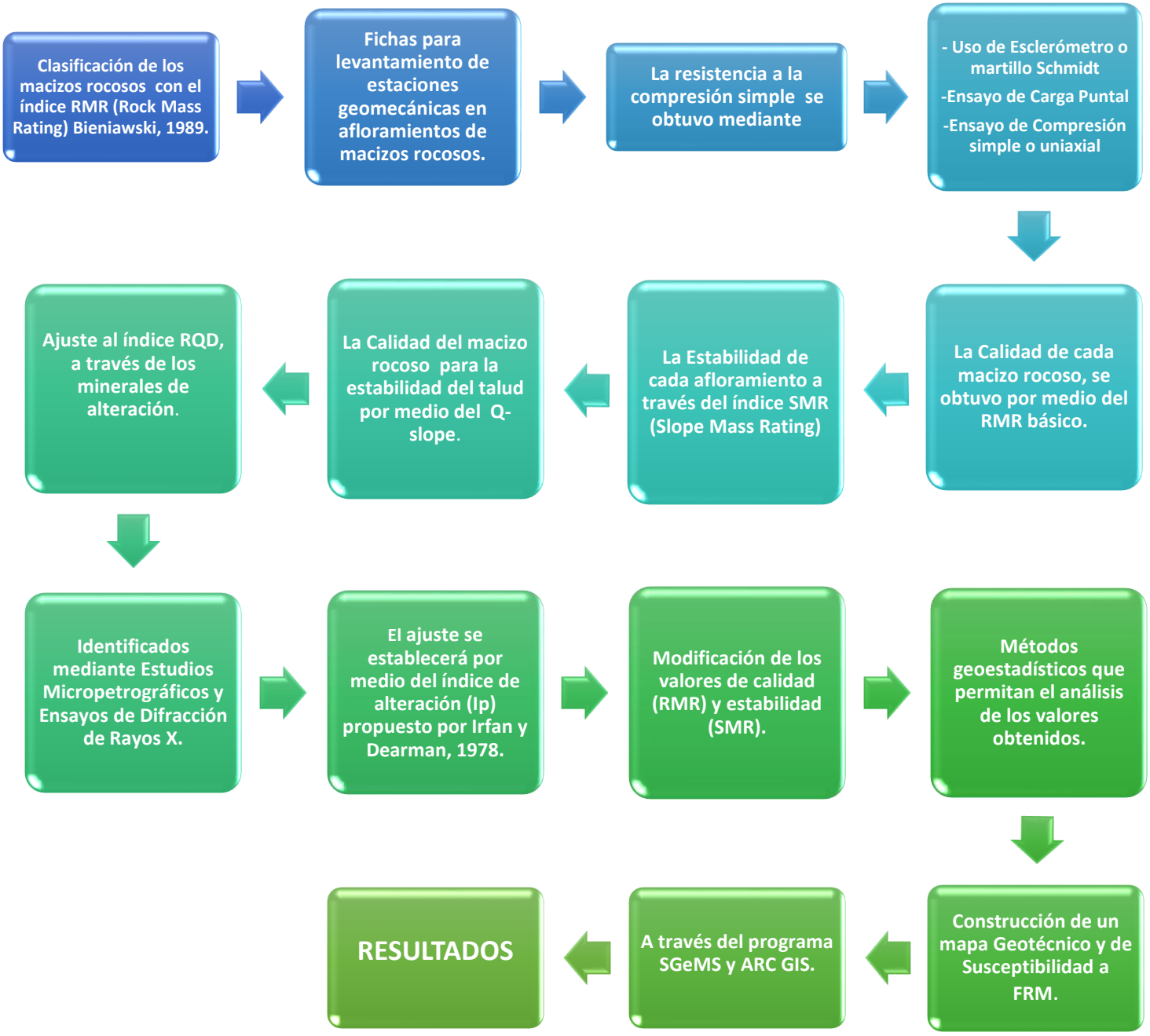

Figura 15. Diagrama de Flujo resumen de la metodología aplicada en este estudio

La “Figura 15” muestra un resumen de toda la metodología que se utilizó en este estudio para obtener los resultados correspondientes.

2.1 Método de Clasificación RMR

Se realizará el levantamiento de información de cada macizo rocoso, considerando todos los parámetros geomecánicos que utiliza el RMR para obtener una puntuación que definirá la calidad de dicho macizo en función del estado de sus discontinuidades. Para caracterizar los diferentes macizos rocosos, se generaron diferentes tablas (González de Vallejo, 2002).

Tabla 5. Descripción Geomecánica de los Macizos Rocosos

Proyecto: **Realizado por:** **Fecha:**				**UTM:** **Localización:**				**Altura:** **Hoja/plano:** **Foto:**	
LITOLOGÍA	**Observación:**				**POTENCIA:**	**FORMACIÓN Y EDAD:**			
FORMACIONES SUPERFICIALES ESTRUCTURA	**Observación:**			**MORFOLOGÍA:**		**ESPESOR:**			
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m3		Muy grandes <1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	M.Pequeños>30	M.brechificado >60	
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadamente blanda (uña) 0		M.Blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 golpe de martillo) 3	Dura (2 Golpes de Martillo) 4	M. Dura (varios golpes) 5	Extrem. Dura (Solo raya con martillo)6	
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizado	IV Muy meteorizado	V Completamente meteorizado		VI Suelo residual		
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo		Caudal estimado		
RESISTENCIA ESCLERÓMETRO(MPa)		> 250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2)	5-1 (1)	<1 (0)	
αs=Dirección del talud					βs= buzamiento del talud				
Talud Natural (15)		Precorte (10)		Voladura suave (8)		Excavación mecánica (0)		Voladura deficiente (-8)	

La “Tabla 5” muestra un resumen de los diferentes parámetros geomecánicos que se deben describir para cada macizo rocoso de la zona. Una vez obtenida dicha información se obtendrá el puntaje correspondiente de cada parámetro que ayudará a identificar la calidad del macizo a través del valor correspondiente obtenido. En la parte inferior de cada tabla se agrega una foto del afloramiento indicando las discontinuidades posibles que se pueden visualizar en la imagen.

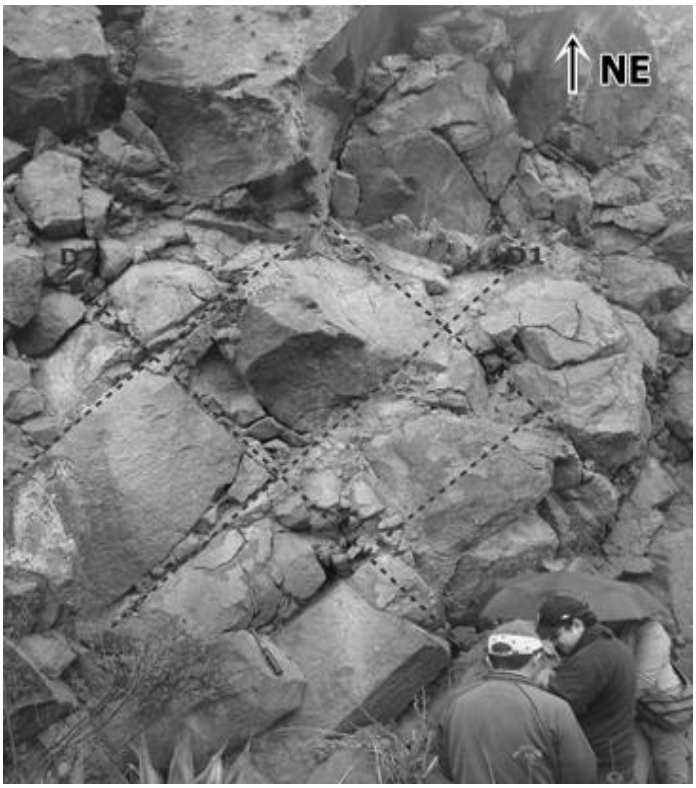

Figura 16. Imagen que acompaña a la descripción del macizo rocoso, UTM (X: 0789022, Y: 10005830)

La “Figura 16” muestra las distintas familias de discontinuidades que se pueden visualizar, se debe considerar la existencia de discontinuidades aleatorias, el número de juntas será notificado en los resultados con sus respectivos rumbos y buzamientos. De cada macizo rocoso se observó las peores características geomecánicas de estabilidad que presentaba el afloramiento. Si en el macizo rocoso existen varias familias de discontinuidades se selecciona las peores condiciones de cada familia, por ejemplo la familia con mayor continuidad, la familia con mayor abertura, la familia con mayor espaciado, la familia con mayor alteración, etc. A continuación se expone mediante una tabla todas las características específicas para la clasificación geomecánica de los macizos rocosos.

Tabla 6. Caracterización de los macizos rocosos.

			PUNTAJE	
Estación N°		N° de Afloramiento		P1
		Tipo de plano		RP
		Dirección de Buzamiento(°)		260
		Buzamiento (°)		45
RQD = 100 e-0.1λ (1 + 0.1λ)		90-100%	20	
		75-90%	17	
		50-75%	13	
		25-50%	6	
		<25%	3	
Separación entre diaclasas		>2m	20	
		0.6 - 2m	15	
		0.2 -0.6 m	10	
		0.06 - 0.2 m	8	
		< 0.06m	5	
Condiciones de Discontinuidad	Longitud de discontinuidad	<1m	6	
		1 - 3 m	4	
		3 - 10 m	2	
		10 - 20 m	1	
		>20 m	0	
	Abertura	Nada	6	
		<0.1 mm	5	
		0.1 - 1 mm	3	
		1- 5 mm	1	
		>5mm	0	
	Rugosidad	Muy rugosa (Rugosa Escalonada)	6	
		Rugosa (Lisa Escalonada y Rugosa Ondulada)	5	
		Ligera. Rugosa (Pulida Escalonada y Lisa Ondulada)	3	
		Lisa (Pulida Ondulada y Lisa Plana)	1	
		Espejo de falla (Pulida Plana)	0	
	Relleno	Ninguno	6	
		Relleno duro <5mm	4	
		Relleno duro > 5 mm	2	
		Relleno blando <5mm	2	
		Relleno blando >5mm	0	
	Alteración	Inalterada	6	
		Ligeramente alterada	5	
		Moderadamente alterado	3	
		Muy alterado	1	
		Descompuesto	0	
Agua Freática		Seco	15	
		Ligeramente húmedo	10	
		Húmedo	7	
		Goteando	4	
		Agua Fluyendo	0	
Resistencia a la compresión simple		>250	15	
		250-100	12	
		100-50	7	
		50-25	4	
		25-5	2	
		5-1	1	
		<1	0	
RMR básico				77

Todas las características que se encuentran en la “Tabla 6” fueron previamente analizadas en el Capítulo I, se debe recordar que el RQD está relacionado con el grado de fracturación del macizo. El factor de rugosidad se asignó dependiendo el estado de la superficie de cada discontinuidad. El RMR básico se obtiene de las anteriores características con su respectivo puntaje. Cada puntaje fue propuesto por Bieniawski 1973 y actualizado en 1989, para definir la calidad geomecánica de los macizos rocosos. El resultado será utilizado para cálculos de estabilidad del talud y ajustes del RDQ a través de los minerales de alteración. Cabe recalcar que para cada macizo se considera la peor condición que desfavorece la estabilidad del talud. Las medidas son efectuadas con cinta métrica y brújula. El tipo de plano fue designado por rotura plana (RP), o por vuelco (RV), se consideró estas dos opciones debido a que son las que aparecen con mayor frecuencia y ayudan en la utilización de los parámetros del SMR que Romana propone en 1997.

2.1.1 Determinación del RQD

Para determinar el RQD se calculó en función del número de fisuras por metro, esto se determinó directamente en el campo mediante una línea de exploración y se utilizó la siguiente ecuación que Priest y Hudson en 1976 propusieron:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}\, x\, (0{,}1\lambda + 1)$$ Donde λ=n° de fisuras/ espacio (lineal)

Ecuación 6.

2.2 Métodos de resistencia a la compresión simple

2.2.1 Método utilizando el Esclerómetro o Martillo de Schmidt

Para los ensayos in situ, se trata de preparar las zonas elegidas, se aparta la pátina que presenta la roca meteorizada. Para que la superficie se encuentre lisa se utiliza una piedra de amolar. En la ejecución del ensayo se procede primero a posicionar el martillo perpendicular a la superficie de la roca donde se va ensayar, segundo se dispara el punzón de impacto propulsando el martillo hacia el plano de ensayo hasta que el puente salte, tercero pulsar el botón para bloquear el punzón de impacto después de cada empuje. A continuación, lea y anote el valor de rebote indicado por el puntero y escala. La norma ASTM recomienda 10 lecturas, y recomienda quitar las lecturas que difieran más de 7 golpes del promedio y después promediar las restantes. La medida de rebote se correlaciona con la resistencia mediante el siguiente gráfico.

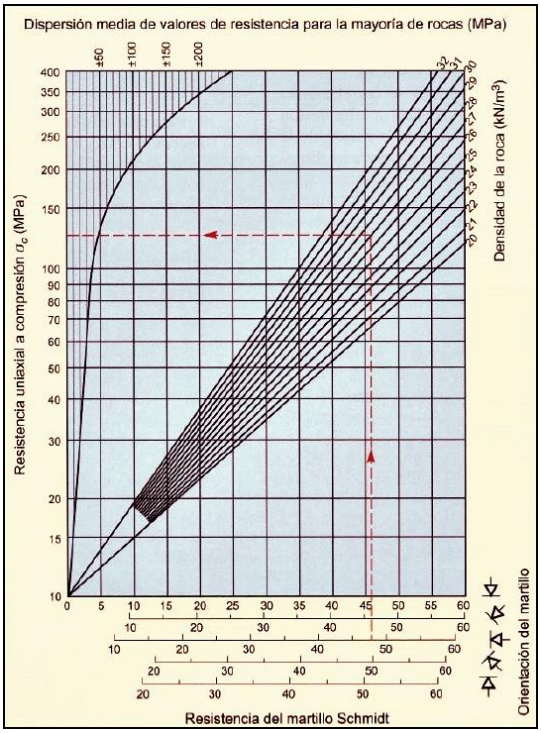

Figura 17. Ábaco de resistencia a la compresión simple (Tomado de Vallejo de González, 2002)

“Figura 17”, ábaco que presenta la resistencia a la compresión simple, en la parte inferior se ubica el valor medio de los datos obtenidos con el esclerómetro, la dirección que se realizó el ensayo, la densidad de la roca designada se ubica en la derecha del abanico, para luego obtener el valor de resistencia en la parte izquierda. Este método es utilizado para calibrar los datos de resistencia a la compresión simple.

2.2.2 Método de ensayo de carga puntual

Para obtener los valores de compresión simple con el ensayo de carga puntual, primero se debe extraer los bloques con dimensiones específicas de cada afloramiento para poderlos rediseñar en el laboratorio. Los bloques deben tener las correctas dimensiones que propone la normativa estándar para este tipo de ensayo (ASTM, 2015). Por último se ubica el bloque dentro del aparato de prueba de carga, el cual ejerce presión a través de dos puntas hasta romper el bloque y su medida se obtiene por medio de un manómetro.

Figura 18. Aparato de prueba de carga

“Figura 18”, el aparato de prueba de carga está conformado por (1) bloque donde se llevará a cabo la prueba, (2) dos puntas de dureza estándar, (3) manómetro que determina la presión en PSI y kg/cm^2, (4) escala sujeta al tamaño de la muestra.

Para obtener la medida del manómetro se ejerce presión a través de una palanca hacia los pistones hasta romper el bloque, luego el manómetro nos mostrará el valor de presión que se obtuvo.

La resistencia a la compresión simple se obtiene mediante diferentes parámetros que se deben calcular y son los siguientes:

Alto, Ancho, Profundidad, son las diferentes medidas que se deben medir para cada bloque.

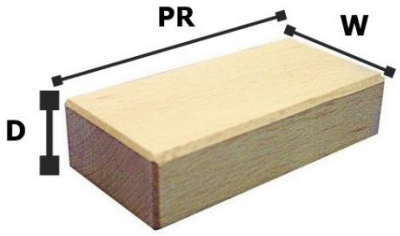

Figura 20. Medidas de muestra (D) alto, (PR) profundidad, (W) ancho.

Área de Pistón, diámetro de las dos puntas que presionan al bloque.

P, esfuerzo que presenta cada bloque antes de fracturarse, en diferentes unidades PSI y N/cm^2.

KN, el tipo de carga que se necesita para fracturar el bloque, expresado en KN, se obtiene multiplicando la Presión sobre el área de Pistón, manejando adecuadamente las unidades correspondientes.

Diámetro de la muestra, es el equivalente de un cuadrilátero, y su fórmula es la siguiente: 2 x Raíz ((lado x lado)/Pi).

Is, índice de carga puntual no corregido, es igual a la relación entre la carga KN y el diámetro al cuadrado. Is = KN/D2

F, factor de corrección de tamaño, expresado F= (Diámetro/50)$^{0.45}$ (ASTM, 2016) Este factor es aplicado a todos los bloques que no tenga un diámetro similar a 50 mm.

$Is_{(50)}$, se obtiene mediante el índice de carga puntual no corregido por el factor de corrección de tamaño, **$Is_{(50)}$= Is x F**

$$Is_{(50)} = F \times Is.$$

Ecuación 7. (Normativa D 5731-16)

Después se realiza una relación entre la fuerza de carga puntual y la fuerza compresiva uniaxial (UCS) a través de diferentes autores que utilizan las siguientes expresiones.

Kassim and Mohammad (2007)

1) Is<1 MPa UCS = 12,23 $Is_{(50)}$ + 1,75

2) Is>1 MPa UCS = 14,45 $Is_{(50)}$ + 0,096

Sabatakakis et al. (2008)

1) Is<2 MPa UCS = 13 $Is_{(50)}$

2) Is=2-5 MPa UCS = 24 $Is_{(50)}$

3) Is>5 MPa UCS = 28 $Is_{(50)}$

González de Vallejo (2002)

1) UCS = 23 $Is_{(50)}$

Quane y Russel (2015)

Rocas duras UCS = 24,4 $Is_{(50)}$

Rocas suaves UCS = 3,86 $(Is)^2_{(50)}$

A continuación se muestra la “Tabla 7” resumiendo todos los datos anteriores.

Tabla 7. Ensayo de carga puntual

N° Muestra	P7
Alto (cm) D	2,9
Ancho (cm) W	6
Profundidad PR (cm)	6,3
Área de Pistón, medido en la máquina (cm^2)	14,426
P (PSI)	1150
P(N/cm^2)	792,9
Carga (KN)	11,4
Diámetro (cm)	4,7
W x D/Pi	5,539
Diámetro (cm^2)	22,2

Is, (Mpa)	5,2
F	1,0
Is(50)(Mpa)	5,0
Kassim and Mohammad (2007) (Mpa)	72,7
Sabatakakis et al. (2008) (Mpa)	120,6
Wei liang et al.(2015)(Mpa)	122,6
González Vallejo (2002)(Mpa)	115,6

2.2.3 Método de ensayo de compresión simple

Para realizar este tipo de ensayo se necesita cubos de 5 cm o 10 cm, por lo cual procedemos a cortar de los bloques de cada afloramiento seleccionado.

Figura 20. Diseño de los cubos para ensayo de compresión simple

Luego medimos cada lado y ubicamos en una tabla de trabajo. Esta medición se realiza dos veces para obtener un promedio que arrojará un valor más preciso en el momento de obtener el valor final de resistencia. También se ubica el peso correspondiente para cada cubo.

Figura 21. Bloques para el Ensayo de Compresión Simple

Después de realizar estas medidas, los bloques son ubicados dentro de dos placas que ejercen presión y se usa una malla metálica de protección en caso de cualquier accidente.

El ensayo consiste en transmitir carga al bloque, mediante las dos placas ubicadas en la parte superior e inferior del bloque, la carga previamente configurada en la máquina subirá gradualmente hasta que ocurra la fractura del bloque.(ASTM C170/C170M, 2017)

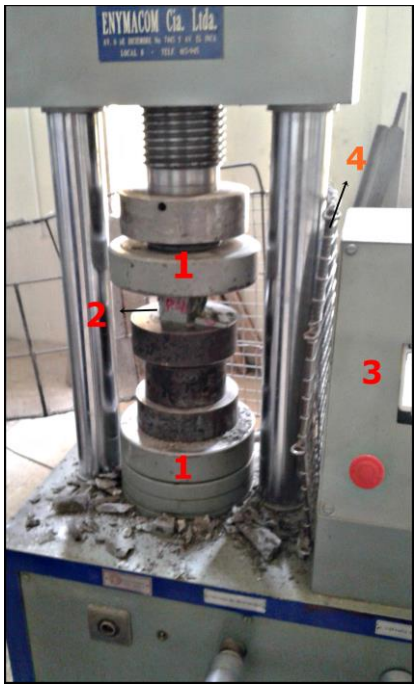

Figura 22. Máquina de compresión simple, (1) Placas que ejercen presión sobre la muestra, (2) Bloque listo para el ensayo, (3) Panel de control, (4) Malla de protección.

Una vez ocurrida la fractura en el bloque y en la máquina se observa que ya no transmita carga, se obtiene el valor correspondiente a la carga máxima que se le proporciono a la muestra hasta romperse, los datos son procesados en una tabla y se alcanza el resultado final mediante la "Ecuación 1".

Tabla 8. Ensayo de compresión simple

Muestra N°	P40
Color	gris-verde
Ancho (cm)	5,27
Largo (cm)	5,21
Altura (cm)	5,23
Peso (gr)	405
Carga Máx (Ton)	14,453
Carga Máx (KN)	141,7
ÁREA (cm2)	27,4567
R.C.S (Mpa)	51,62

En la "Tabla 8" se observa todos los datos organizados y procesados del ensayo de carga puntual. La resistencia a la compresión simple o uniaxial (RCS ó UCS) es calculada con la "Ecuación 1".

2.3 Metodología para clasificar los macizos rocosos

Bieniawski en 1989 propuso la siguiente clasificación según la puntuación obtenida del RMR básico.

Tabla 9. Calidad de los macizos rocosos.

Clase	Calidad	Valoración RMR
I	Muy buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy Mala	< 20

Ejemplo, en la “Tabla 6” se pude identificar el afloramiento P1, el cual utilizaremos para definir la calidad del macizo rocoso. La sumatoria de todos los parámetros del afloramiento P1 es igual a 77, por lo cual en la valoración del RMR ver “Tabla 9”, se puede señalar que este afloramiento tiene una buena calidad. Este valor después será ajustado a través del RQD.

2.4 Método de clasificación SMR

Para este tipo de clasificación se consideró el rumbo y buzamientos del talud y de las discontinuidades que afectan principalmente a la estabilidad del talud. El SRM está relacionado con el RMR y factores anteriormente mencionados, por lo cual se ha utilizado la “Ecuación 3”, para alcanzar el resultado. A continuación podemos observar la tabla que se utilizó para ubicar los resultados.

Tabla 10. Factores del índice SMR

N° Afloramiento	Factor de Ajuste					Puntaje del SMR
	Orientación de las juntas				Método de Excavación	
	F1	F2	F3	Total	F4	
P1	0,15	0,85	-50	-6,4	-8	66

El afloramiento P1 muestra un puntaje de 77 para el RMR básico y después al aplicar los factores del índice SMR se obtiene un valor de 66, ver “Tabla 10”.

Asignando un valor de estabilidad para el talud por medio de ajustes de orientación de las discontinuidades y ajuste por técnica de excavación.

En los macizos rocosos están considerados los tipos de rotura plana o rotura por vuelco, se puede contemplar otros tipo de rotura pero se designó a estos dos grupos por ser los de mayor ocurrencia y ayudan en el cálculo del SMR a través de los índices propuesto por Romana en 1985.

Tabla 11. Estabilidad de los macizos rocosos.

Clase	Puntuación SMR	Detalle	Estabilidad
I	100 - 81	Muy buena	Total estable
II	80 - 61	Buena	Estable
III	60 - 41	Normal	Parcialmente estable
IV	40 - 21	Mala	Inestable
V	< 20	Muy mala	Total Inestable

Ejemplo

Para poder utilizar la clasificación SMR se debe realizar lo siguiente.

Primero realizamos el ajuste por orientación de juntas. Identificamos el tipo de plano y utilizamos el factor correspondiente.

En la “Tabla 10” observamos el afloramiento P1, con un tipo de rotura plana, señalado en la “Tabla 6”, para obtener el primer factor F1, se considera la dirección de las juntas (αj) y el talud (αs), por lo cual se escoge el caso y se aplica la ecuación mostrada en la “Tabla 3” que es |αj – αs|, obteniendo un ángulo de 35°, lo que da un puntaje de 0,15.

Caso		Muy Favorable	Favorable	Normal	Desfavorable	Muy Desfavorable
P T	|αj - αs| |αj - αs-180°|	>30°	30° - 20°	20° - 10°	10° - 5°	< 5°
P y T	F1	0,15	0,4	0,7	0,85	1

Después el factor F2 solo depende del buzamiento de la junta (βs) que representa la peor condición, para el Afloramiento P1 es 45° por lo cual recibe un puntaje de 0,85.

P	|βj|	<20°	20° - 30°	30° - 35°	35° - 45°	>45°
	F2	0,15	0,4	0,7	0,85	1
T	F2	1	1	1	1	1

El factor F3, es la relación de buzamientos entre la junta (βj) y el talud (βs). Para el afloramiento P1 el buzamiento de la junta que presenta la peor condición es 45°y del talud es 46°, entonces tomando el caso correspondiente se resta los dos valores y se obtiene -1, dando un puntaje de -50.

P T	βj - βs βj + βs	> 10° <110°	10° - 0° 110° - 120°	0° >120°	0 - (-10°) ---	< -10° ---
P y T	F3	0	-6	-25	-50	-60

El factor F4, el ajuste por el método de excavación fue determinado en campo.

Factor de ajuste por el método de excavación (F4)					
Método	Talud natural	Precorte	Voladura Suave	Excavación Mecánica	Voladura Deficiente
F4	+15	+10	+8	0	-8

En este caso el afloramiento P1 su geometría fue originada por una voladura suave, obteniendo un puntaje de -8. Por último se alcanza el SMR, multiplicando los factores F1, F2, F3, más la sumatoria del factor F4 y el RMR básico. Para el Afloramiento P1 se obtuvo un valor de 66, describiendo al macizo rocoso como estable.

2.5 Método de clasificación índice Q-slope

En este método se considera 5 parámetros que observamos anteriormente en la clasificación RMR básico, el índice de calidad de roca RDQ, el índice de diaclasado (Jn), el índice de rugosidad (Jr) e índice de alteración (Ja), a estos dos índices anteriores se aplicará un factor de ajuste de orientación propuesto por Barton y Bar en el 2015, también se considera el ambiente y condiciones geológicas (Jw) y por último el factor de reducción de esfuerzo (SRF), que se obtendrá de las condiciones físicas presentes en la superficie de cada macizo. El puntaje de cada parámetro se encuentra detallado en la siguiente tabla, la cual señala las características y el valor para cada factor.

Tabla 12. Caracterización del índice Q-slope (Barton & Bar, 2015)

INDICE Q Slope			N° de Afloramiento										
PARÁMETROS	**Características**	**Puntaje**											
1. Calidad del testigo RQD(%)	Muy mala	0-25											
	Mala	25-50											
	Media	50-75											
	Buena	75-90											
	Excelente	90-100											
2.Índice de diaclasado (Jn)	Roca masiva	0,5-1,0											
	1 familia de diaclasas	2											
	1 familia y algunas aleatorias	3											
	2 familias de diaclasas	4											
	2 familias y algunas diaclasas aleatorias	6											
	3 familias de diaclasas	9											
	3 familias y algunas diaclasas aleatorias	12											
	4 o más familias	15											
	Roca triturada	20											
3.Índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Diaclasas discontinuas	4											
	Onduladas,rugosas o irregulares	3											
	Onduladas, lisas	2											
	Onduladas, perfectamente lisas	1,5											
	Planas, rugosas o irregulares	1,5											
	Planas, lisas	1											
	Planas, perfectamente lisas	0,5											
4. Índice de alteración de las discontinuidades (Ja)	Discontinuidad cerrada	0,75											
	Planos de discontinuidad inalterados	1											
	Planos de discontinuidad ligeramente inalterados.Minerales no reblandecibles.	2											
	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3											
	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción.	4											
	Partículas arenosas, libre de arcilla	4											
	Fuertemente sobreconsolidados, minerales arcillosos no blandos	6											
	Sobreconsolidación media a baja, minerales arcillosos.	8											
	Rellenos de arcillas expansivas	8-12											

5. Factor de orientación de Discontinuidad	Muy favorable	2												
	Bastante favorable	1												
	No favorable	0,75												
	No muy favorable	0,5												
	Provocando un fallo si no está con soporte	0,25												
6.Ambiente y condiciones geológicas Jwice	**Desierto Húmedo Tropical Hielo**		$\frac{Jr}{Ja}$ X Factor de Orientación											
Estable, competente roca	1 0,7 0,5 0,9													
Estable, incompetente roca	0,7 0,6 0,3 0,5													
Inestable, competente roca	0,8 0,5 0,1 0,3													
Inestable, incompetente roca	0,5 0,3 0,05 0,2													
7. SRFa: Condición fisica	Ligero aflojamiento debido a la localización de la superficie	2,5												
	Bloques sueltos, señasles de tensión de grietas y discontinuidades de cillaza	5												
	Similar a la anterior, pero fuerte suceptibilidad a efectos de alteración	10												
	Talud esta en un avanzado estado de erosión y perdida por erosión del agua.	15												
	Talud residual, material transportado y deslizado	20												
		Total												

Barton y Bar, 2015, propusieron cómo obtener el ángulo de la pendiente más empinada (β) a través de una fórmula , lo que indicará el máximo ángulo de estabilidad para este talud, por lo cual no requerirá refuerzos o soportes para pendientes entre 35º y 85º con alturas menores a 30 m. La ecuación para obtener este ángulo de estabilidad es la siguiente.

$$\beta = 20 \log_{10} Qslope + 65°$$

Ecuación 8.

La siguiente tabla contiene la información sobre el puntaje del índice Q-slope obtenido, (Barton, 2000). El valor final mostrará la calidad de cada macizo rocoso y se podrá correlacionar con el RMR básico. La clasificación del sistema Q se correlaciona con el Q-slope.

Tabla 13. Clasificación del índice Q (Barton, 1974)

Clasificación	Valoración índice Q-slope
Roca excepcionalmente mala	0,001 y 0,01
Roca extremadamente mala	0,011 y 0,1
Roca muy mala	0,11 y 1
Roca mala	1,1 y 4
Roca media	4,1 y 10
Roca buena	10,1 y 40
Roca muy buena	40,1 y 100
Roca extremadamente buena	100,1 y 400
Roca excepcionalmente buena	400,1 y 1000

Para poder correlacionar el índice Q-slope con el RMR básico, Barton y Bieniawski propusieron las siguientes ecuaciones.

RMR básico = 9 lnQ + 44; donde $Q = e^{(RMR-44)/9}$ (Bieniawski, 1989)

Ecuación 9.

RMR básico = 15 logQ + 50; donde $Q = 10^{(RMR-50)/15}$ (Barton, 1995)

Ecuación 10.

2.6 Método para ajustar el índice de calidad de roca (RQD)

Para poder realizar este tipo de ajuste se distinguió las litologías que constituyen la matriz rocosa que conforman los distintos macizos rocosos, donde a partir de la determinación de sus minerales de alteración y el porcentaje aproximado de cada mineral, sea posible utilizar el índice de alteración para corregir el índice de calidad de roca (RQD) a través de diferentes autores e ideas, en dónde se pretende que el RQD disminuya progresivamente a medida que aumente el grado de meteorización de los minerales que componen la matriz rocosa que se está evaluando.

Para identificar los minerales de alteración se realizó estudios macroscópicos, análisis de láminas delgadas y Ensayos de Difracción de Rayos X.

2.6.1 Estudio Micropetrográfico

Es una de las herramientas que se utilizó para poder ajustar el índice RQD, para realizar este tipo de estudio, se escogió muestras que presentaban algún indicio de alteración y que no se podía identificar a simple vista con la lupa.

Luego de seleccionar las muestras se procedió a cortarlas y obtener un chip. Posteriormente se realizó las láminas delgadas en el laboratorio de Geología con los instrumentos adecuados, en total se realizaron 24 láminas delgadas de la zona de estudio.

A continuación se realizó el estudio micropetrográfico, a través de un análisis modal donde se obtuvieron los siguientes resultados (ver Anexo 3.3).

2.6.2 Estudio de Ensayo de Difracción de Rayos X

También se utilizó el análisis de Ensayo de Difracción para poder modificar el índice RQD, y poder complementar el análisis micropetrográfico.

Para poder elaborar este Ensayo se necesitó la trituración, pulverización de las muestras hasta un tamaño de ~ 40 micras. Seguidamente se ubicó la muestra pulverizada en la máquina de Rayos X, que interpretó la composición química de cada ejemplar, por medio de difracción se identificó a cada mineral. Este ensayo se realizó en el laboratorio del Departamento de Metalurgia Extractiva (ver Anexo 3.5).

2.6.3 Modificación al índice RQD

Este método toma como referencia el porcentaje de minerales que se encuentran alterados, los minerales no alterados y microfisuras, utilizando la ecuación explicada por Irfan y Dearman, 1978 y desarrollada con la idea de factor de seguridad en taludes, se ha formado la siguiente ecuación con sus respectivos parámetros.

$$\mathrm{Ip} = \frac{\%\ \text{de minerales primarios}}{\%\ \text{de minerales secundarios}} \qquad (\text{Irfan y Dearman}, 1978)$$

Ecuación 11.

Ip es el índice micropetrográfico, el cual indica el grado de alteración del macizo rocoso.

Minerales primarios el autor considera el cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita, biotita y minerales accesorios. Mientras que los **minerales secundarios** como la sericita, la gibbsita, la caolinita, clorita, óxidos de hierro junto con las microfisuras y vacíos que resultaban de la alteración.

Tabla 14. Porcentaje de mineral alterado y microfisuras (Irfan y Dearman, 1978)

Estado	Ip	% mineral alterado	% Microfisuras
1. Fresco	>12	<6	< 0,5
2. Parcialmente manchado	12-6	6 -12	0,5 - 2
3. Completamente Manchado	6-4	12- 15	2 - 5
4. Moderadamente Alterado	4-2	15 - 20	5 - 10
5. Altamente/completa Alterado	2	20	10

También se analizó la correlación que presentaba el grado alteración con la resistencia a la carga puntual y a la compresión simple.

Tabla 15. Correlaciones con el estado de alteración (After Irfan y Dearman, 1978)

Estado	Resistencia a la carga Puntual (MPa)	Resistencia a la Compresión simple (MPa)
1. Fresco	>10	>250
2. Parcialmente manchado	6-10	150-250
3. Completamente Manchado	4-6	100-150
4. Moderadamente Alterado	0,1-4	2,5-100
5.Altamente/completa Alterado	<0,1	<2,5

Una vez interpretado los datos recogidos en este estudio, se modificó estos parámetros a través de los resultados que se obtuvieron, a continuación se expone una tabla con los datos del presente caso. Cabe recalcar que se escogió los afloramientos que disponían de mayor información.

Tabla 16. Resultados obtenidos de las muestras de la zona

Afloramiento	% de mineral alterado	% de microfisuras	Resistencia a la carga puntual (Mpa)
P1	8	6	7
P2	25	22	0,95
P3	15	18	1,05
P4	14	10	3,35
P5	15	12	3,55
P6	7	6	8,05
P7	12	8	5,25
P11	7	6	10
P12	18	11	2,2
P17	5	4	10,1
P20	12	10	4
P23	18	15	1,5
P24	18	8	2,7
P25	10	8	3
P27	16	7	2,85
P28	10	8	5,5
P31	13	15	3,1
P32	20	15	2,1
P33	30	14	0,9
P35	12	14	3,85
P40	30	14	1,85
P41	25	12	2,6

Comparando la "Tabla 14" y la "Tabla 15" se observa claramente como el grado de alteración se muestra inversamente proporcional a la resistencia, por lo cual se realizó un gráfico a partir de los datos que se exponen en la "Tabla 16" para buscar la correlación mencionada anteriormente.

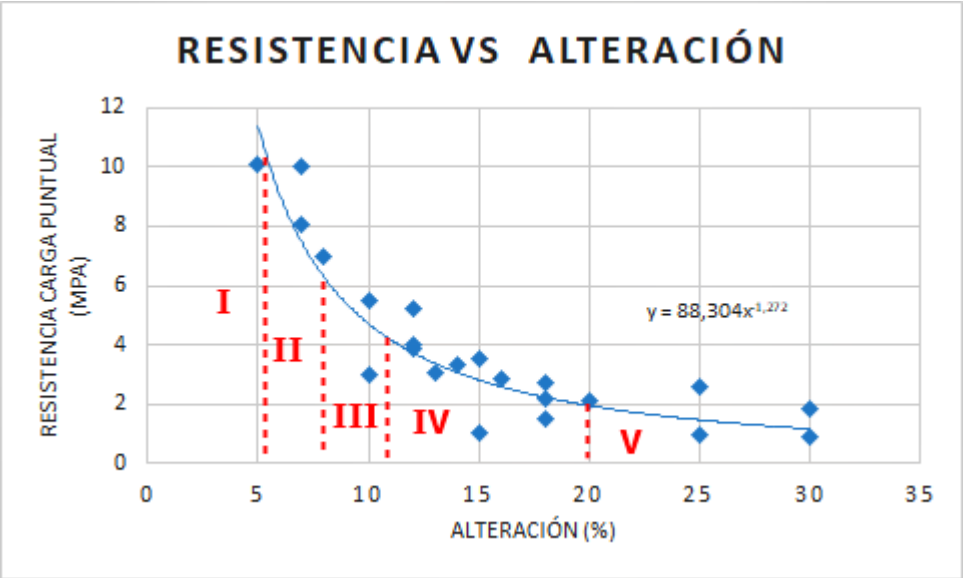

Figura 23. Con números romanos se muestra el estado del macizo rocoso.

La “Figura 23” expone la correlación inversamente proporcional, la cual establece que cuando aumenta la variable independiente (Alteración), la variable dependiente (Resistencia) disminuye en la misma proporción que presenta y viceversa. La función de este tipo presenta la siguiente forma: y= k/x, donde k es una constante (AulaFacil, 2017).

A continuación se expone la “Figura 25” que representa una proporción inversa, cuando y = 3/x.

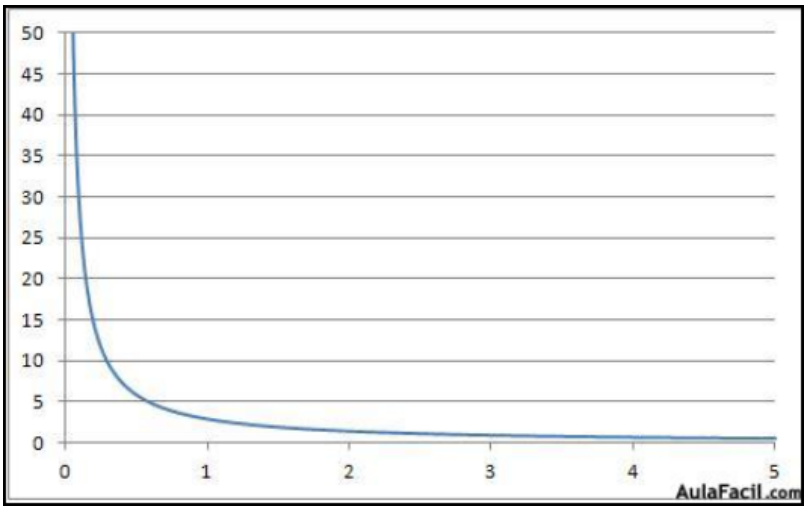

Figura 24. Gráfica de función inversamente proporcional (AulaFacil, 2017).

Dicho lo anterior, se puede observar en la “Figura 23” que si incrementa la alteración la resistencia disminuye, y si disminuye la alteración la resistencia incrementa.

La “Figura 23” justifica esta proporcionalidad inversa por medio de la ecuación que exhibe la línea de tendencia del gráfico.

$$y = \frac{88{,}304}{x^{1{,}272}}$$

Ecuación 12.

Esta “Ecuación 12” fue generada a partir de los 22 datos presentados en la “Tabla 16”, de tal manera que generó un nuevo rango de porcentaje de mineral alterado para el índice de alteración (Ip).

Tabla 17. Nuevo rango de mineral alterado

Estado	Ip	Nuevo rango de % mineral alterado
1. Fresco	>12	<5,5
2. Parcialmente manchado	12-6	5,5 - 8,3
3. Completamente Manchado	6-4	8,3 - 11
4. Moderadamente Alterado	4-2	11 - 20
5. Altamente/completa Alterado	2	> 20

Así mismo se consideró el porcentaje de microfisuras presentes. La relación del porcentaje de microfisuras también es inversamente proporcional con la resistencia, “Tabla 15”, entonces se procedió a graficar los datos expuestos en la “Tabla 16”.

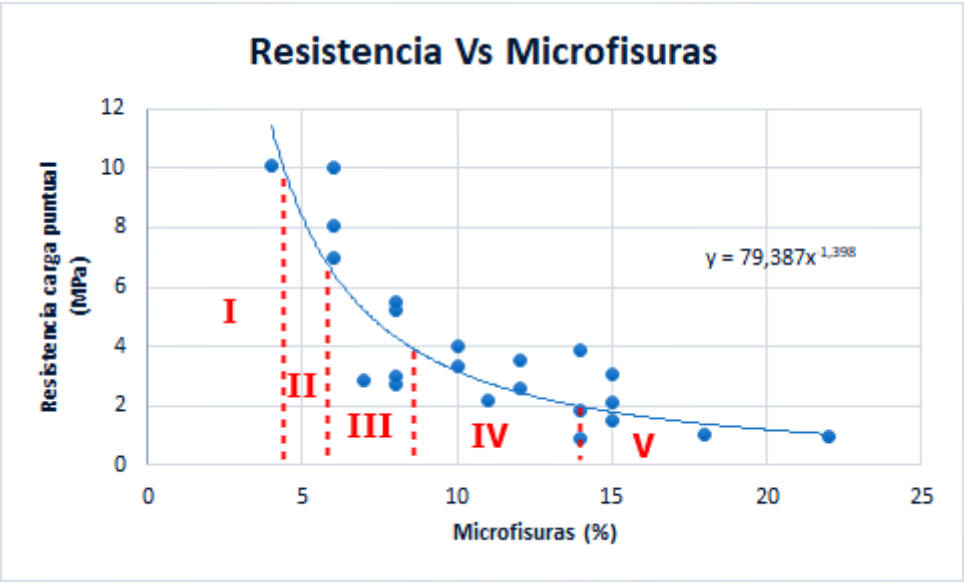

Figura 25. Con números romanos se muestra el estado del macizo rocoso.

La “Figura 25” expone la correlación inversamente proporcional que presenta la resistencia con el porcentaje de microfisuras en las muestras, está justificado a través de la siguiente ecuación que exhibe la línea de tendencia del gráfico.

$$y = \frac{79{,}387}{x^{1{,}398}}$$

Ecuación 13.

Esta “Ecuación” 13 fue generada a partir de los 22 datos presentados en la “Tabla 16”, de tal manera que se generó un nuevo rango de porcentaje de microfisuras para el índice de alteración (Ip).

Tabla 18. Nuevo rango de microfisuras

ESTADO	IP	NUEVO RANGO DE MICROFISURAS (%)
1. Fresco	>12	< 4
2. Parcialmente manchado	12-6	4 - 6
3. Completamente Manchado	6-4	6 - 8
4. Moderadamente Alterado	4-2	8 - 14
5. Altamente/completa Alterado	2	> 14

Se ha encontrado un nuevo rango “Tabla 18” y “Tabla 17” para el porcentaje de alteración y microfisuras, posteriormente con este nuevos valores se modificó el índice de alteración (Ip) a través de la relación del porcentaje de mineral resistente y el porcentaje de mineral de alteración más microfisuras existentes (Ip’). Después se procedió ajustar el RQD a través del valor promedio de alteración más microfisuras existentes, observar “Tabla 19”.

$$\mathrm{Ip}' = \frac{\%\ \text{mineral resistentes (minerales primarios)}}{\%\ \text{minerales alterados (minerales secundarios)} + \text{(microfisuras)}}$$

Ecuación 11.1

Se modificó la “Ecuación 11” propuesta por Irfan y Dearman, 1978, donde se considera al porcentaje de microfisuras parte de los minerales secundarios y en la “Ecuación 11.1” se puede visualizar de manera adecuada esta relación.

Tabla 19. Ajuste al RQD

Nuevo Ip'	Estado	Mineral de alteración (%)	Microfisuras (%)	Ajuste al RQD	
>9	Fresco	<5,5	< 4	-9%	**Cantidad de alteración y microfisuras en promedio existente en la roca**
8,9-6	P. Manchado	5,5 - 8,3	4 - 6	-12%	
5,9-4	C. Manchado	8,3 - 11	6 - 8	-17%	
3,9-2	M. Alterado	11 - 20	8 - 14	-27%	
<1,9	C. Alterado	> 20	> 14	-34%	

El Ip' se adaptó al rango de porcentaje de mineral alterado y de microfisuras, otorgando esto un nuevo rango de valores y proporcionando un porcentaje de ajuste para la respectiva corrección al índice RQD. El nuevo porcentaje de mineral alterado se adapta a la ecuación 12.

Como observamos en la "Tabla 19" cada rango del Ip' tiene un porcentaje de microfisuras "Tabla 18" y un porcentaje de mineral alterado "Tabla 17", de cada nivel o rango tomaremos el promedio del porcentaje de microfisuras y lo sumaremos con el promedio de porcentaje de mineral alterado para obtener el valor de ajuste para cada estado de alteración.

Una vez encontrado el nuevo **Ip'** se podrá ajustar el parámetro RQD, el valor de ajuste es el valor promedio de alteración + el valor promedio de microfisuras para cada estado. Esta cantidad anterior se restará del RQD no corregido. Después de realizar el ajuste, los demás parámetros e índices serán modificados y sus resultados se observarán a través de un mapa.

Ejemplo aplicando el método 2.6

Para ajustar este índice se ha considerado los minerales de alteración que generalmente se encontraron en las rocas de la zona, a través de láminas delgadas y difracción de rayos X se pudieron identificar los siguientes minerales alterados:

Clinocloro, vermiculita, yeso, clorita, calcita, caolinita, epidota y óxidos de Fe. También se consideró las microfisuras parte de los minerales inestables.

La muestra P40 muestra las siguientes características.

Tabla 20. Mineral resistente (MR), mineral alterado (MA) para la muestra P40.

Mineral	Porcentaje del mineral %	Clase de mineral
Grupo Plagioclasas (albita, andesina, anortita)	27	MR
Clinocloro	30	MA
Vermiculita	4	MA
Cristobalita	-	MA
Gypsum	-	MA
Cuarzo	15	MR
Caolinita	14	MA
Muscovita	7	MR
Cordierita	3	MA
Calcita	-	MA
Natrojarosita	-	MA

La muestra P40 muestra un 14% de microfisuras. RQD no corregido = 17,12% y RMR básico = 33

Utilizando la "Ecuación 11" se obtiene el siguiente resultado.

$$Ip' = \frac{cuarzo\ (15\%) + muscovita\ (7\%) + plagioclasas\ (27\%)}{clinocloro\ (30\%) + vermiculita\ (4\%) + caolinita\ (14\%) + microfisuras\ (14\%)} = 0{,}8$$

Ip'= 0,8

Revisando la "Tabla 19", el ajuste de corrección será de -30%. Este valor se resta del RQD no corregido obteniendo un RDQ corregido =0%.

Tabla 21. Calidad de roca (Bieniawski, 1989)

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICAS	PUNTAJE
RQD	90-100%	**20**
	75-90%	**17**
	50-75%	**13**
	25-50%	**6**
	<25%	**3**

En la “Tabla 21” se observa el puntaje del RQD en un rango dado. Como el nuevo RQD corregido es igual a 0%, entonces el puntaje es 3. Pero el RQD no corregido era 17,12% lo cual significa que obtiene el mismo puntaje de 3, por lo tanto el RMR mantendrá su puntuación.

2.7 Método para realizar el mapa Geotécnico

Para realizar el mapa geotécnico se necesita clasificar a cada macizo de la zona, por su calidad y estabilidad, estos parámetros se encuentran en la metodología 2.4 y 2.3.

2.7.1 Método de simulación basado en celdas

A través de la geoestadística utilizando el programa SGeMs, se determinara una simulación basada en celdas, dentro de las cuales se asumirá que las propiedades son homogéneas, el cual permite la simulación de variables categóricas (Clase) y de variables continuas (SMR).

El primer paso es ubicar todos los datos que van hacer analizados en el formato correspondiente. Por lo cual se sitúa organizadamente en una hoja de texto.

DATA: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

```
DATA
9
POINT_X
POINT_Y
SMR
CLASE
Class1
Class2
Class3
Class4
Class5
789022  10005830  65.625  1  1  0  0  0  0
788827  10008801  55.25   3  0  0  1  0  0
788543  10008740  59      3  0  0  1  0  0
788253  10009055  70.1    2  0  1  0  0  0
786113  10000118  27      4  0  0  0  1  0
786132  10000359  53.35   3  0  0  1  0  0
787259  10002177  38      4  0  0  0  1  0
787508  10001635  49      3  0  0  1  0  0
788858  10002354  36.75   4  0  0  0  1  0
788929  10002178  60.5    3  0  0  1  0  0
788806  10001812  39.9    4  0  0  0  1  0
788882  10001713  42      3  0  0  1  0  0
789031  10001560  48      3  0  0  1  0  0
788992  10001502  70.25   2  0  1  0  0  0
789030  10001289  65      2  0  1  0  0  0
788818  10001151  59      3  0  0  1  0  0
788413  10000637  57.1    3  0  0  1  0  0
788793  10000775  68.25   2  0  1  0  0  0
783152  10005517  45.6    3  0  0  1  0  0
782756  10005772  13      5  0  0  0  0  1
783388  10005448  43      3  0  0  1  0  0
783585  10005378  64.25   2  0  1  0  0  0
784558  10003938  42.1    3  0  0  1  0  0
784694  10003848  19      5  0  0  0  0  1
784858  10003184  43.5    3  0  0  1  0  0
786325  10010084  26      4  0  0  0  1  0
```

Figura 26. Ingreso de datos en bloc de notas para plotear los datos en el SGeMS

Primero se ubica el nombre del archivo, después el número de columnas presentes, luego la ubicación de los puntos de cada afloramiento en UTM, a continuación aparece el tipo de macizo rocoso (SMR), el peso que recibe cada afloramiento está señalado en la columna cuatro y luego se ubica las diferentes clases que existe. Las últimas 5 columnas están relacionadas con el parámetro Clase, en donde se ubica 1 si pertenece a esa clase y 0 si no pertenece a esa clase.

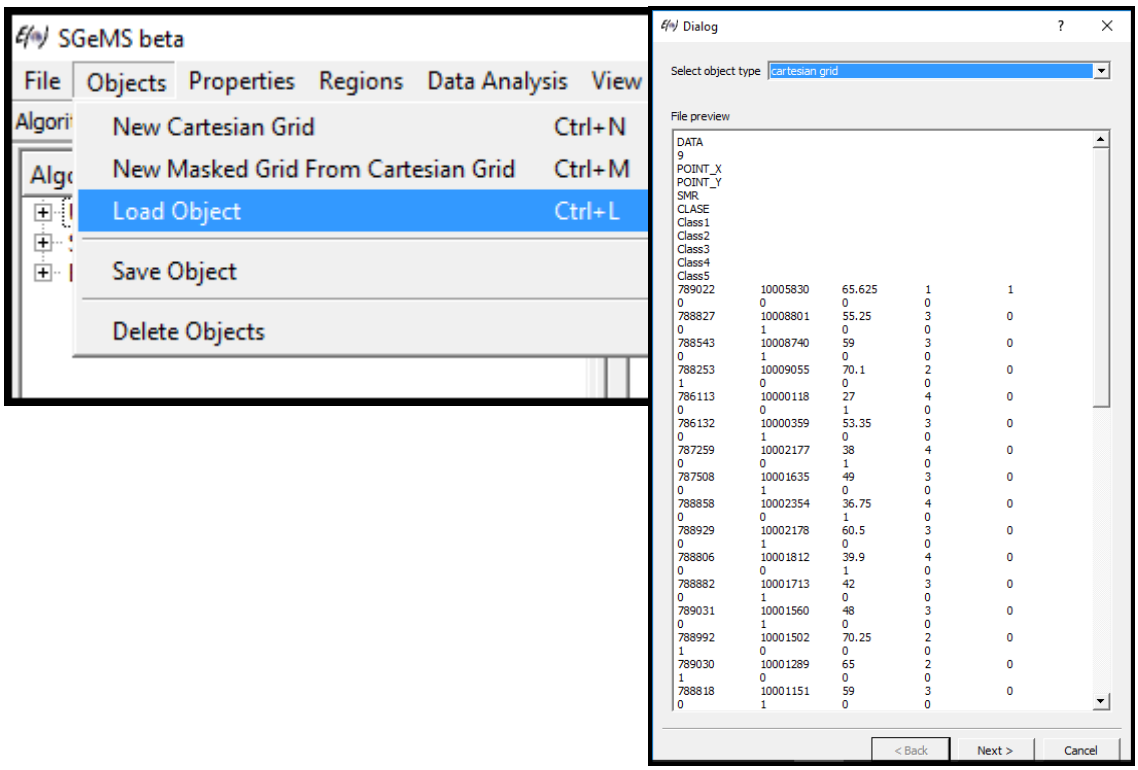

Figura 27. Ingreso de datos al programa SGeMS

Se construye una grilla, la cual ayudará a interpolar y analizar todos los datos que se encuentren dentro de esta. La grilla tendrá la siguientes dimensiones, en X: 180 celdas dirigidas al Este, en Y: 320 celdas dirigidas al norte y cada una tendrá una dimensión de 50 x 50 m para cubrir toda la superficie de estudio.

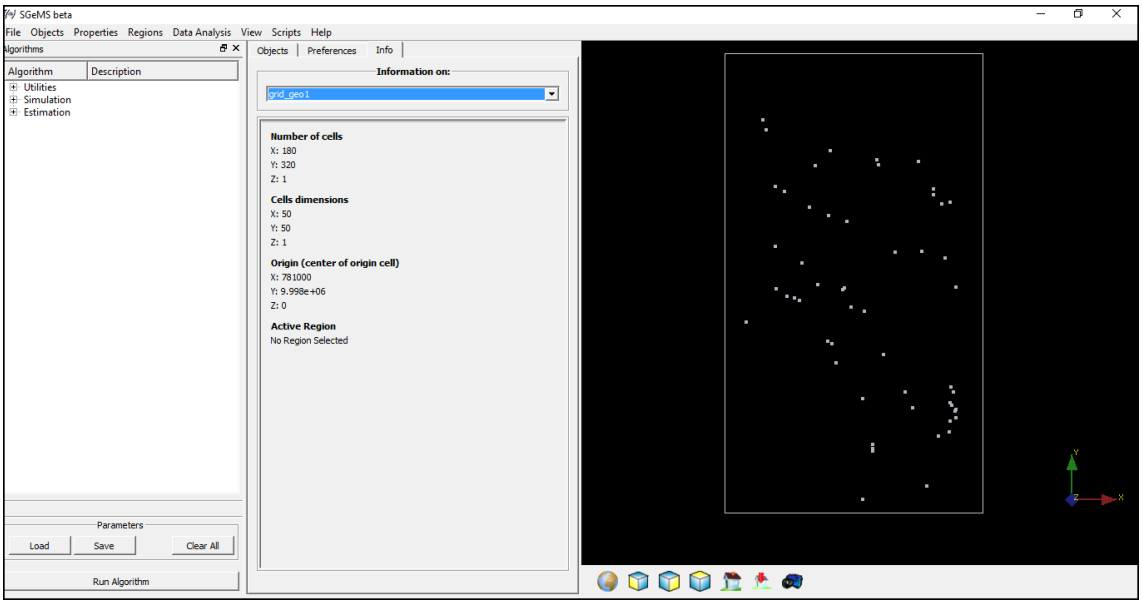

Figura 28. Definición de dimensiones de celda de estudio

Después escogeremos el tipo de modelamiento y simulación, ver “Figura 29”

2.7.2 Modelamiento y simulación

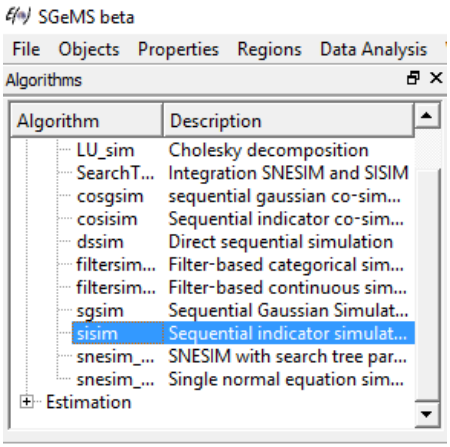

Figura 29. Tipo de modelamiento

En este caso escogeremos la simulación de Sequencial Indicator Simulation.

En la simulación secuencial indicadora (SISIM), el kriging es utilizado para elaborar una función de densidad acumulativa discreta para cada categoría individual de cada evento y se adjudica una variable categórica al nodo (punto designado dentro de la grilla) (Ganán, 2014). Luego se desplegará los siguientes parámetros, ver “Figura 30”.

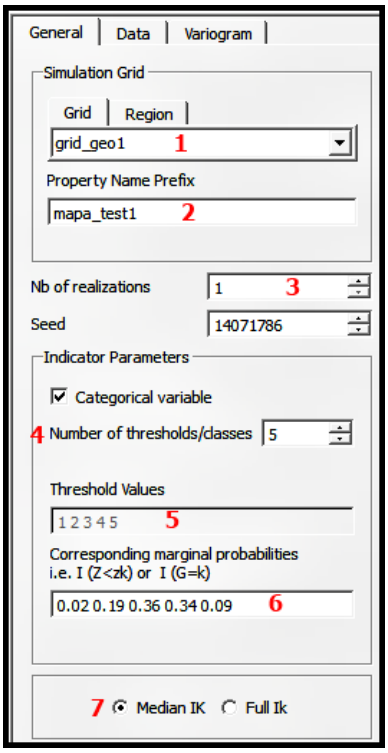

Figura 30. Pestaña General del Sisim

1) En Grid, se escoge la grilla definida anteriormente.

2) El nombre de salida que tomará nuestra simulación.

3) Número de realizaciones de simulación que usted quiere obtener.

4) El número de clase, definido por el estudio es 5, en este caso.

5) Límite de los valores para cada clase.

6) El porcentaje de ocurrencia de cada clase, separados con espacio.

7) El tipo de kriging, en este caso escogimos un modelamiento a partir de un solo variograma que represente la media de toda la clase.

Después en la pestaña de Data se despliega lo siguiente, ver “Figura 31”.

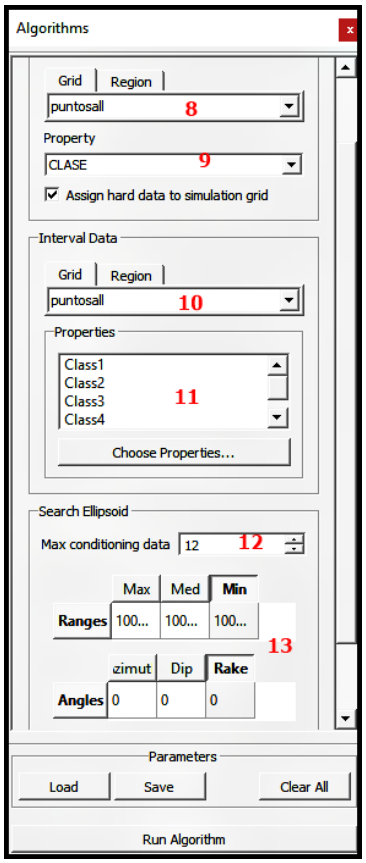

Figura 31. Pestaña de datos de Sisim

8) Se ubica los datos duros que van hacer analizados en la grilla.

9) Se selecciona la propiedad a ser analizada.

10) Se ubica el intervalo de datos.

11) Se escoge cuáles serán las propiedades para ese intervalo.

12) Máximo número de datos que serán retenidos en el vecindario de búsqueda

13) Rango del elipsoide de búsqueda, en este caso hemos colado 100000, para que ningún valor quede fuera del análisis.

Después en la pestaña de Variogram se despliega lo siguiente, ver “Figura 32”.

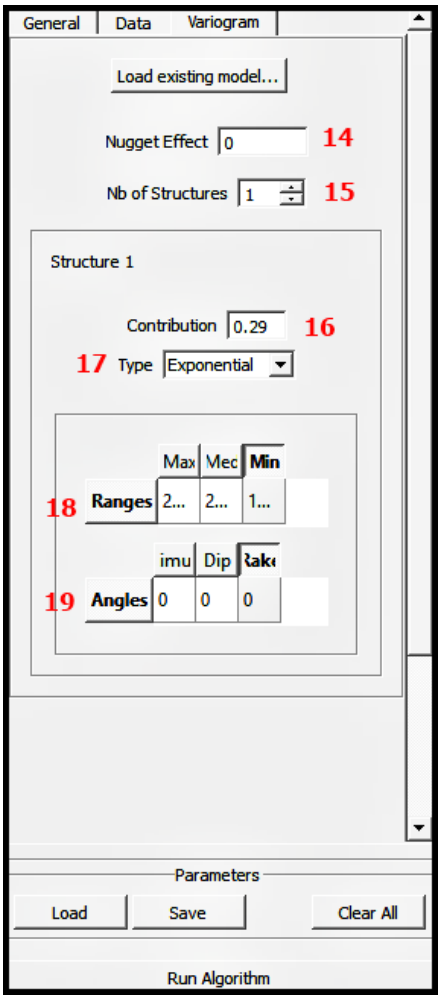

Figura 32. Pestaña de Variograma de Sisim

14) Efecto de pepita, corresponde a un fenómeno aleatorio, sin correlación entre las muestras.

15) Número de estructuras, en este caso corresponde al número de variogramas que se van interpretar en la simulación y modelamiento.

16) La contribución depende del Sill del variograma.

17) Tipo de Variograma, Exponencial, Gaussiano, Esférico.

18) El rango, la distancia máxima, media y mínima que se va hacer la correlación con las muestras.

19) La dirección, y el buzamiento en el cual se va a realizar la correlación. En este caso es 0 significa en dirección Norte – Sur y un buzamiento de 0 ya que trabajamos en dos dimensiones.

Para ubicar los parámetros de la anterior ventana, se debe realizar un variograma, “Figura 33”

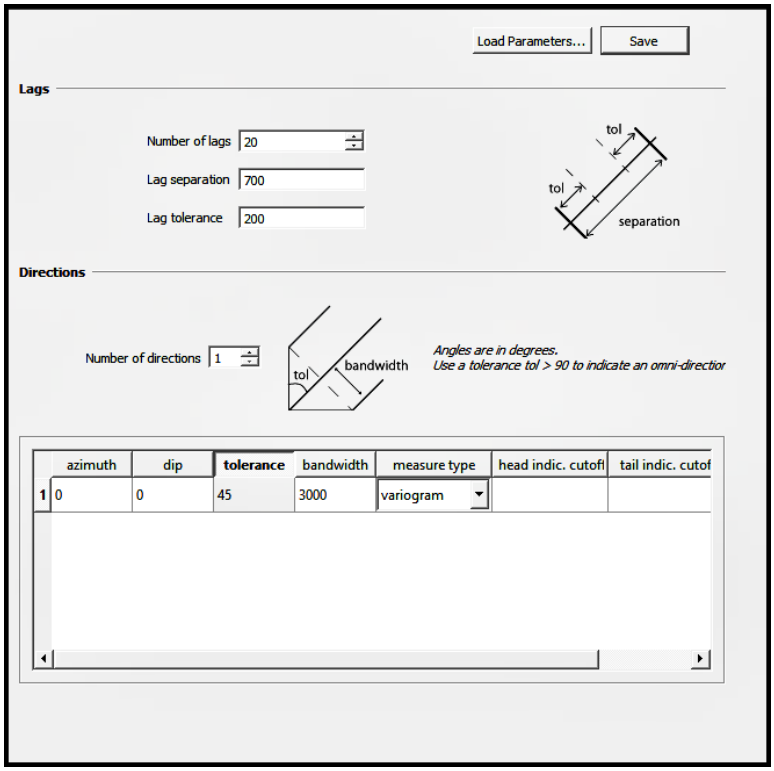

Figura 33. Ubicación de datos para construir el Variograma

El número de lags, depende de la relación que existe entre distancia máxima de un par de puntos y la distancia promedio de los diferentes pares de puntos o muestras. Al final obtenemos un variograma, ver “Figura 34”

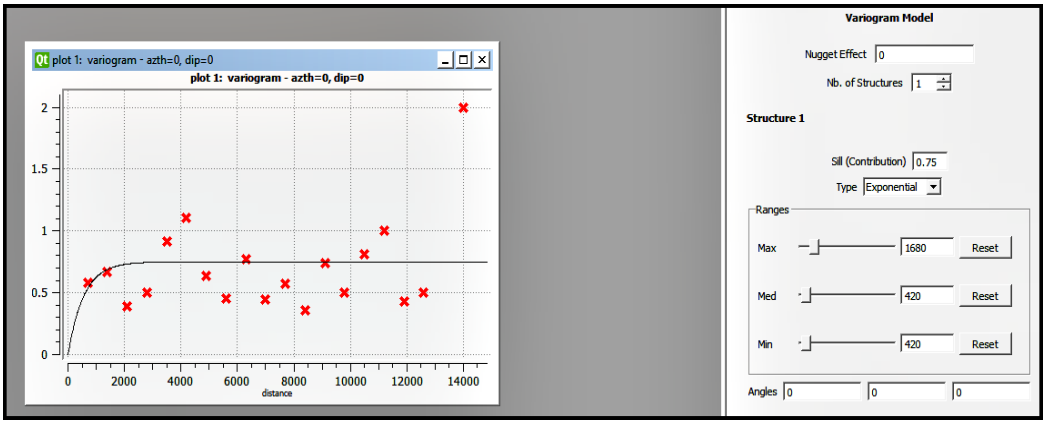

Figura 34. Variograma Experimental.

De aquí obtenemos todos los parámetros para ubicar en la ventana de variogram, “Figura 32”.

En la “Figura 34” se debe realizar un ajuste entre el variograma experimental (rojo) y el variograma teórico (línea color negro). Para determinar el rango máximo, medio y mínimo.

2.7.3 Explicación del método

Se basa en la siguiente aproximación, ver “Figura 35”. Dos puntos se consideran a una distancia (h), una vez fijado el primero de estos dos, el segundo cae en ancho de banda.

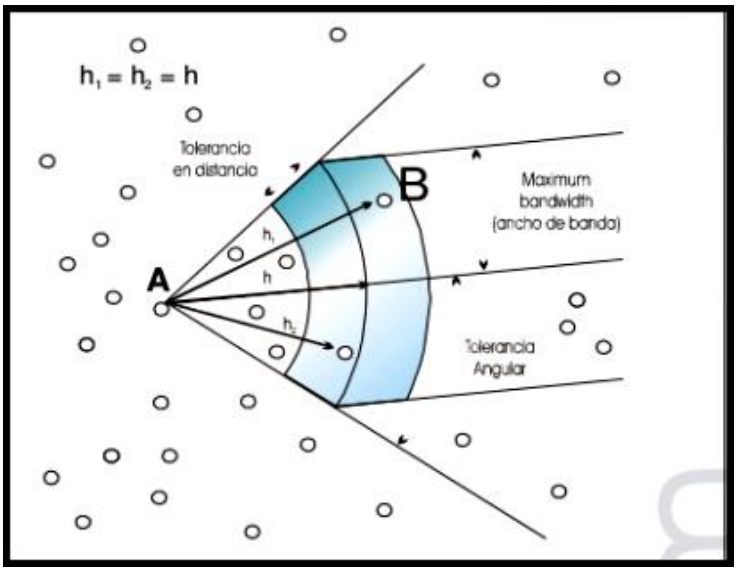

Figura 35. Explicación del análisis con el variograma (IMACGL, 2000).

Se fijó un punto A en uno de los datos de la malla irregular y así a través de este punto se identifica la distancia (h). Con el vértice A se define los parámetros de construcción del gráfico de búsqueda (sector celeste) en donde se indica: el ancho de banda, el ángulo de tolerancia y una tolerancia en distancia.

Una vez establecido el sector lag (sector celeste), se determina la pareja asociada a AB, donde B es un dato del lag a la distancia h de A. Para los otros datos se realiza el mismo procedimiento y se determina el número de parejas asociadas a distintas distancias h.

Al terminar con todos los procedimientos anteriores de la “Figura 32”, se obtendrá un mapa, el cual indicará las diferentes regiones de calidad y estabilidad de los macizos rocosos, ver “Figura 36”.

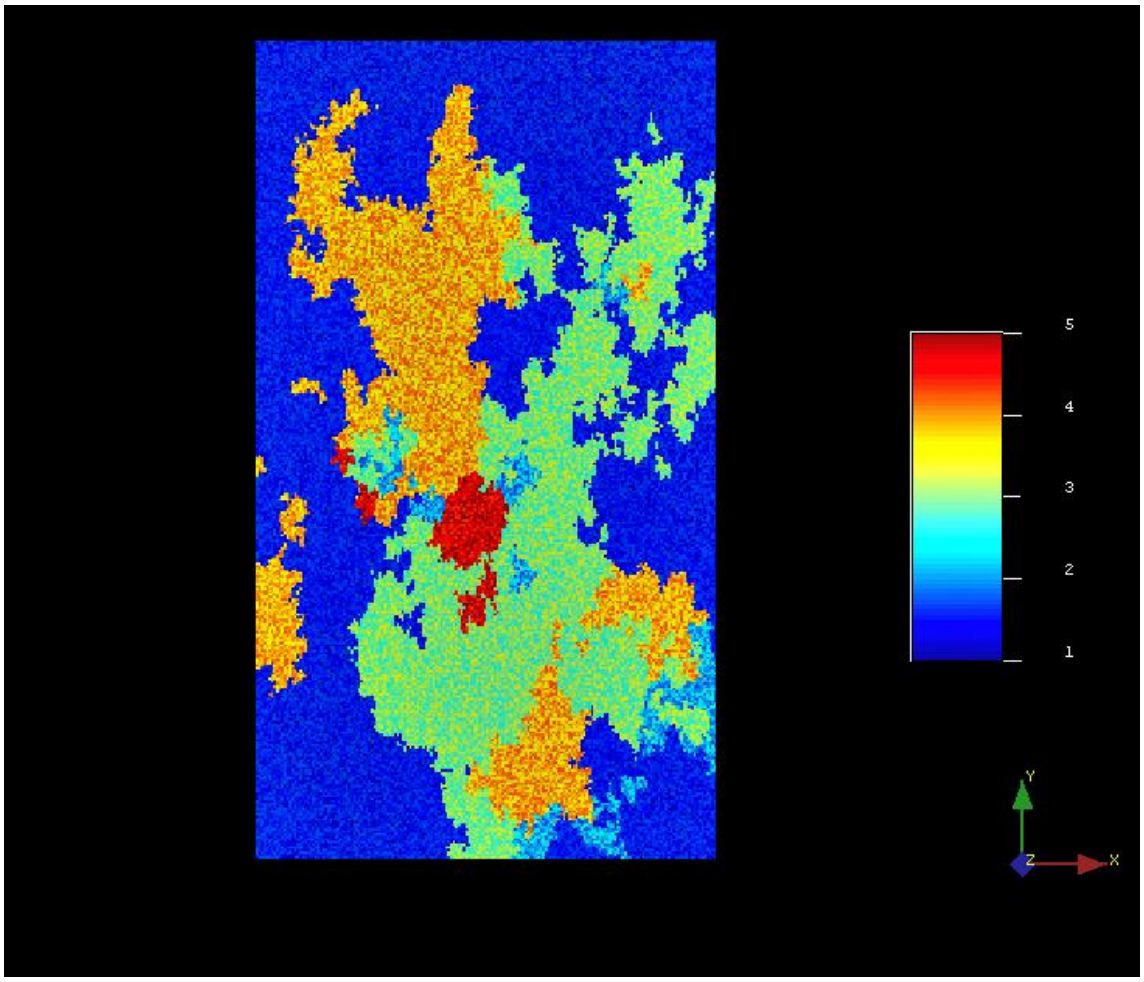

Figura 36. Mapa Geotécnico preliminar, construido en base a geoestadística.

Una vez obtenido el mapa en el programa SGeMS, se procederá a extraer y mejorarlo con las herramientas de Arc Gis.

Para los datos continuos (SMR, RQD), se modelará a través de la Simulación Gaussiana Secuencial se basa en la estabilidad de la zona de estudio y se encuentra asociado a las reglas para simular variables continuas.

Los pasos para realizar el modelamiento son exactamente igual al anterior, lo más importante es obtener el Variograma experimental para obtener los valores de rango, sill, nugget.

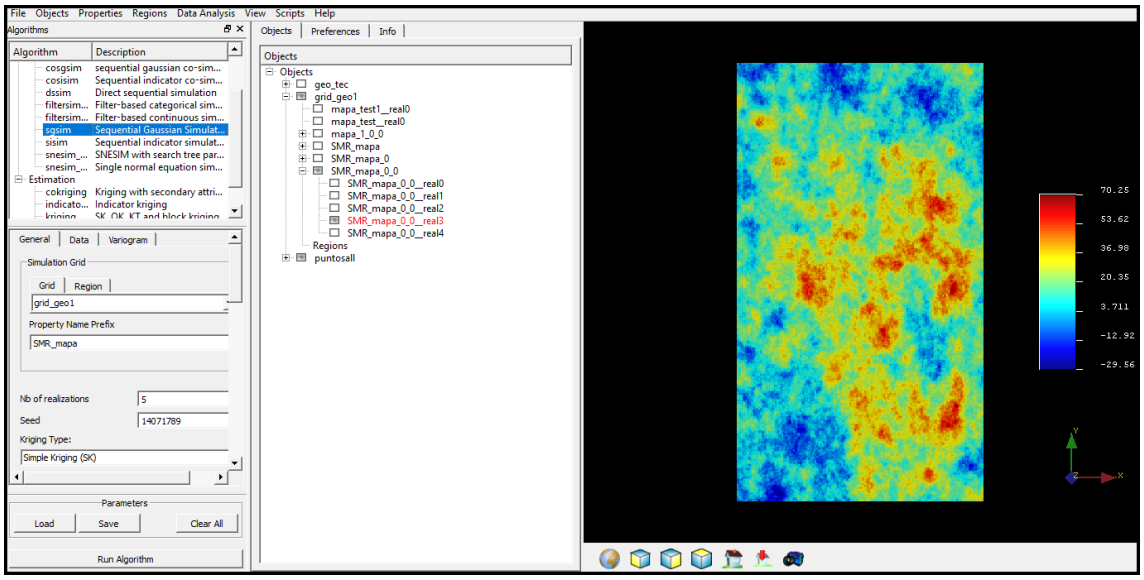

Figura 37. Mapa Geotécnico preliminar de los datos continuos del SMR.

2.8 Método para ver la distribución del RQD en la zona de estudio.

Para poder ver la distribución del índice de calidad de roca y su variación después de realizar el ajuste, se decidió utilizar el análisis geoestadístico del programa ArcGis, en donde realizaremos la interpolación de los valores a través del kriging ordinario, el cual proporcionará una superficie de predicción y medidas de certeza de la distribución del RQD en la zona de estudio.

Primero analizamos la tendencia y distribución de los datos a través de un histograma y un análisis de tendencia, ver “Figura 38” y “Figura 39”.

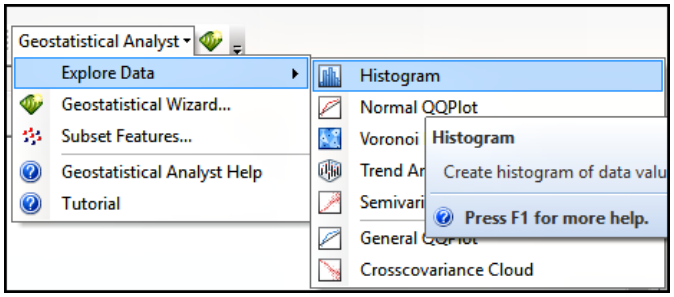

Figura 38. Realización de Histograma.

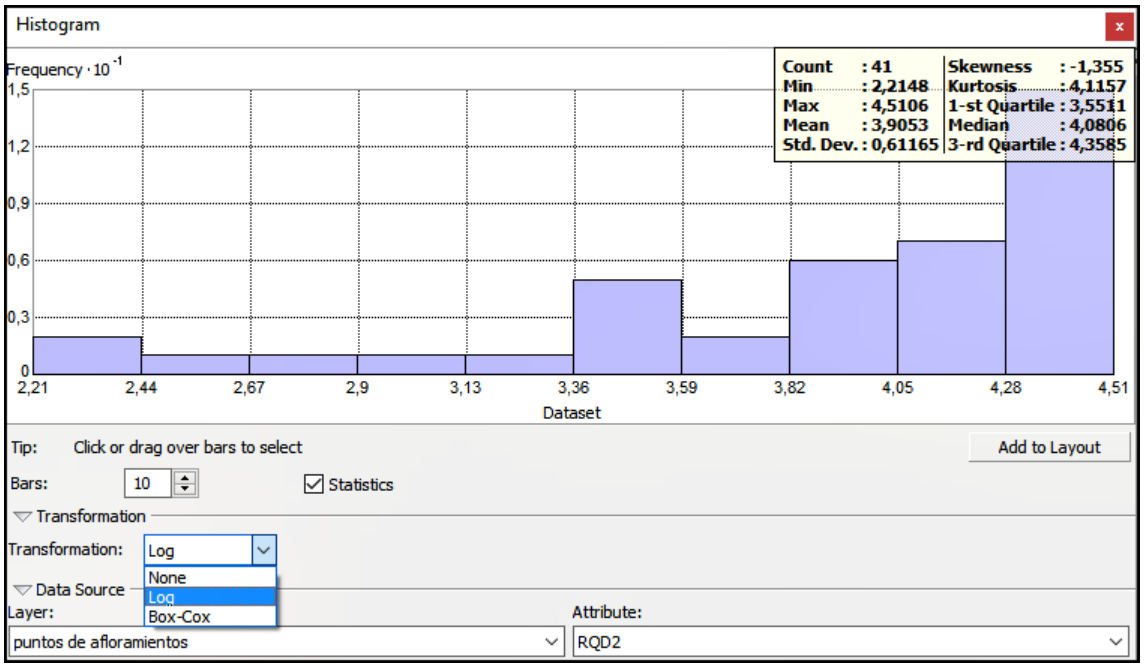

Figura 39. Histograma de los datos del actual estudio.

En la “Figura 39”, en la parte inferior se escoge el tipo de transformación que se va a realizar al Histograma, esto se realiza para que la dispersión de los datos sea mínima, por lo cual la media y la mediana deben aproximarse para obtener este resultado.

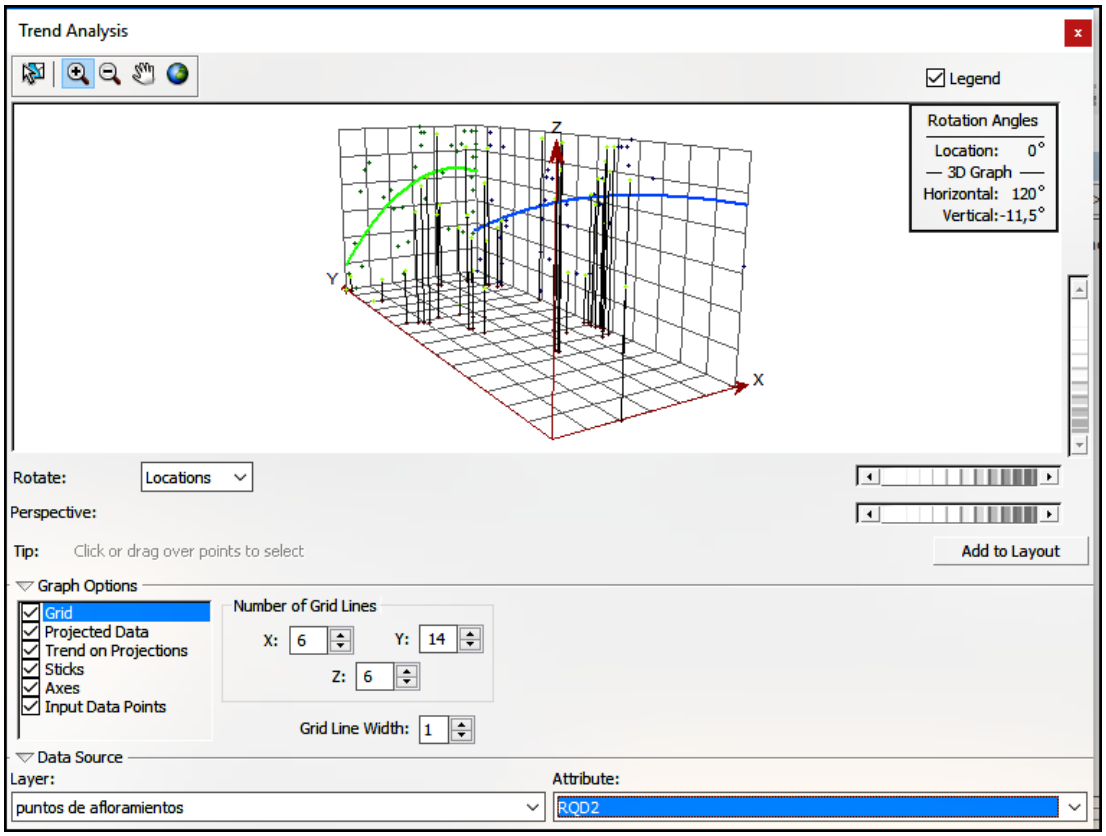

Figura 40. Análisis de los datos del actual estudio.

En la “Figura 40”, realizamos un análisis de tendencia de los datos de la zona, por lo cual se ha determinado que sigue una función parabólica, lo que significa una tendencia de segundo orden, esta tendencia se ubicará en los siguientes pasos.

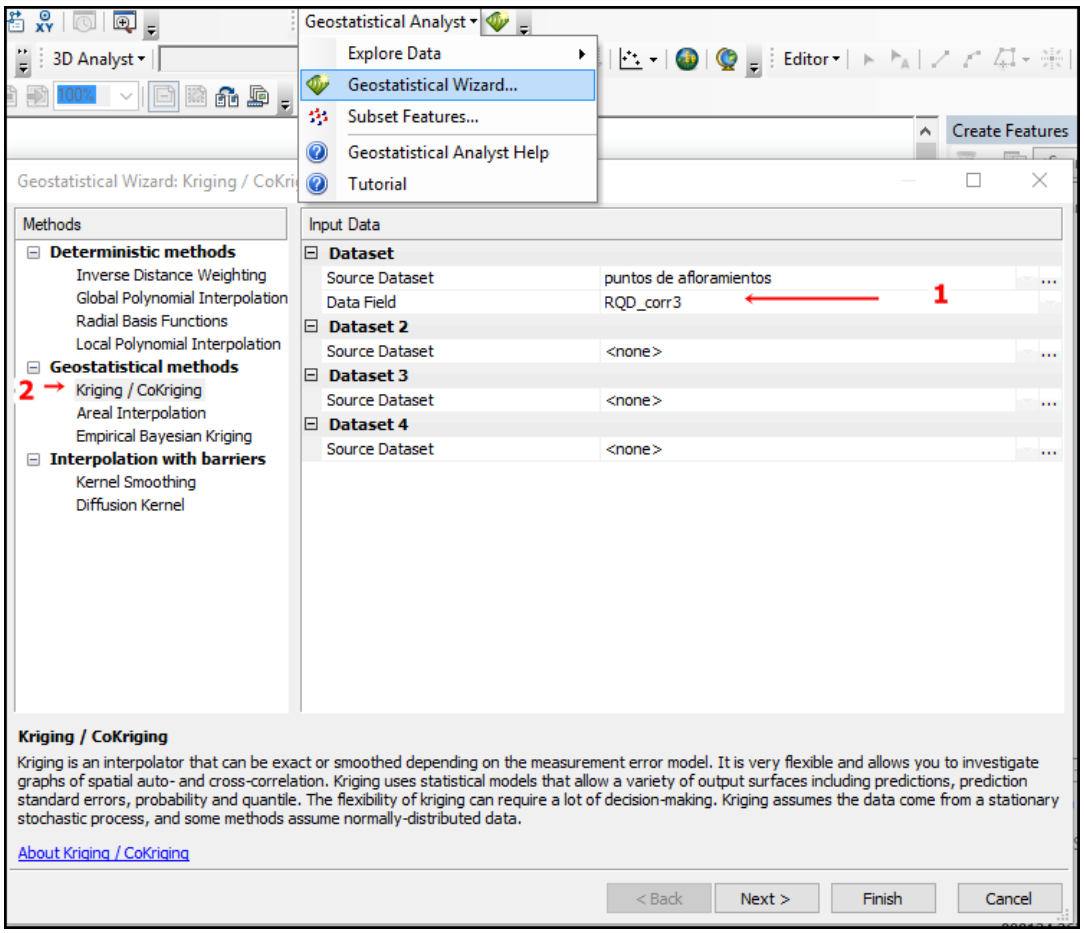

Figura 41. Análisis Geoestadístico

Una vez observado el histograma y analizado la tendencia, se procede a realizar la interpolación, se utiliza el Wizard Geoestadístico, donde (1) se ubica los datos que se van analizar, (2) el método geoestadístico que se va utilizar en este caso es el Kriging.

Una vez ubicado todos estos datos se procede a escoger el tipo de kriging y se señala el tipo de transformación realizada en el Histograma y el grado de tendencia de los datos, ya sea de primero, segundo o tercer orden, ver “Figura 42”.

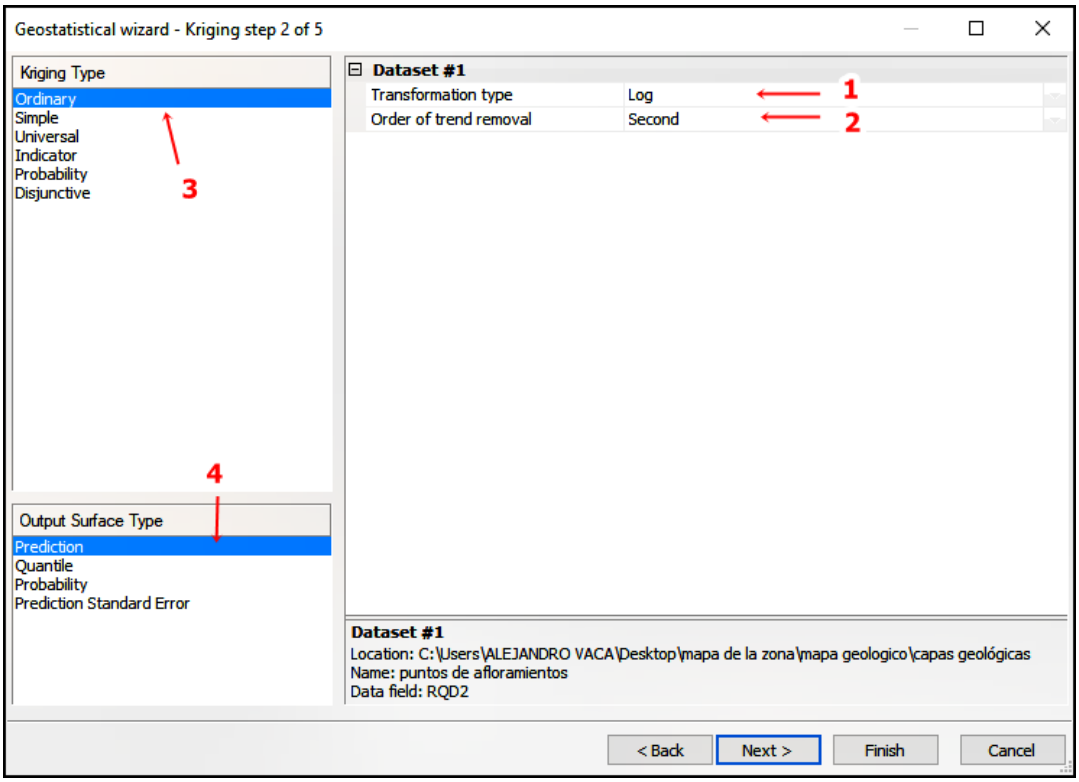

Figura 42. Tipo de Kriging

En la “Figura 42”, observamos (1) el tipo de transformación realizada en el histograma, explicado en la figura 2.8.2. (2) el tipo de orden que representa la línea de tendencia de los datos. (3) el tipo de kriging a utilizarse es el ordinario porque usa los puntos vecinos para la estimación y es una presuposición razonable. (4) el tipo de superficie será creada a través de una predicción previamente analizada.

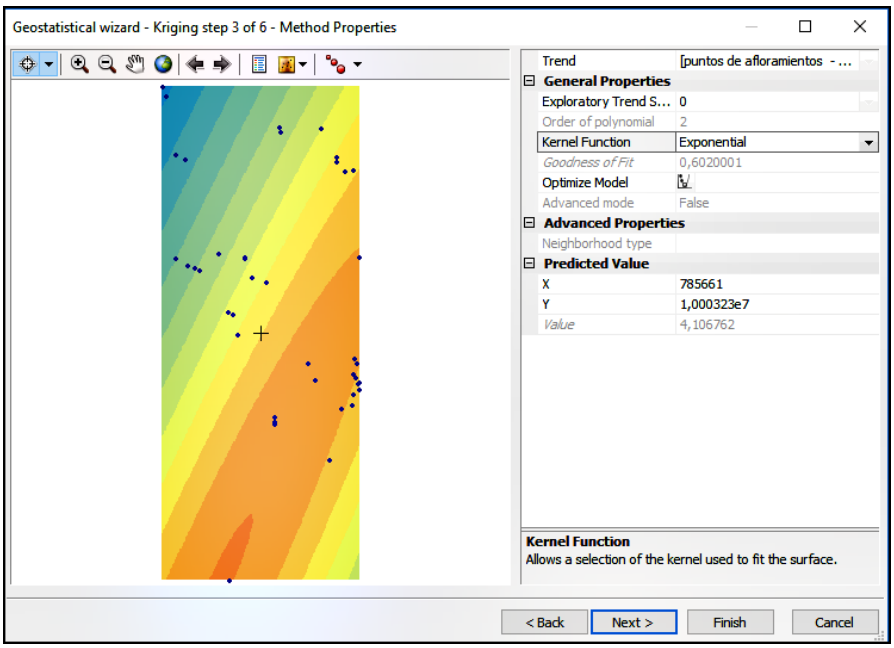

Figura 43. Identificación de alguna anisotropía

En la “Figura 43”, en su parte izquierda se observa una imagen la cual señala si existe alguna tendencia de los datos o algún tipo de anisotropía omnidireccional, y esto debemos tomar en cuenta para poder ubicar este dato en el siguiente paso.

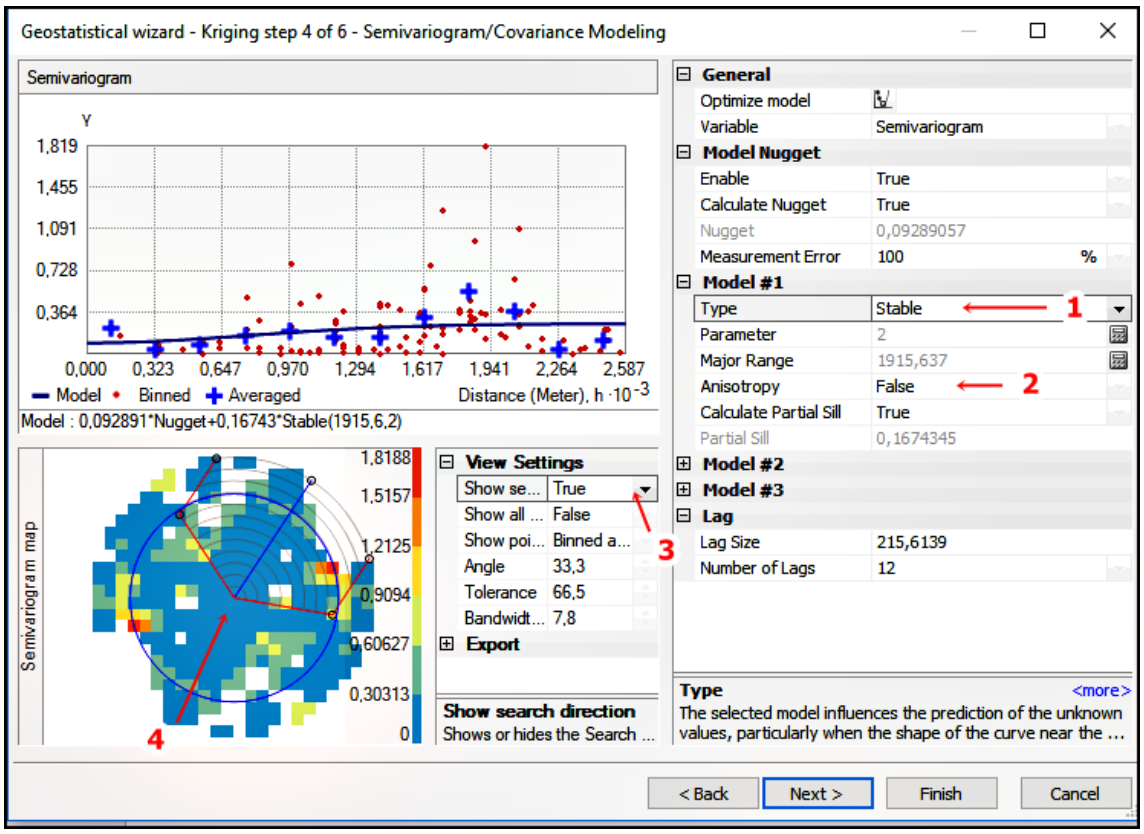

Figura 44. Análisis del Semivariograma

En la “Figura 44” se ubica todo acerca del semivariograma de los datos, (1) el tipo de modelo matemático que desea que represente en el semivariograma, como: exponencial, esférico, gaussiano, etc. (2) se ubica si existe algún tipo de anisotropía explicado en la “Figura 43”. (3) se señala la tendencia de los datos. (4) se grafica el rango de búsqueda y referencial de los datos. En resumen esta figura muestra el rango, el sill, el ángulo de tolerancia, el valor de nugget de un variograma experimental que se ajusta a la distribución espacial de los datos. Todos estos valores son predeterminados por el kriging ordinario.

Después de realizar este proceso anterior, se obtiene una previa de la superficie de predicción de los datos estudiados, ver “Figura 45”.

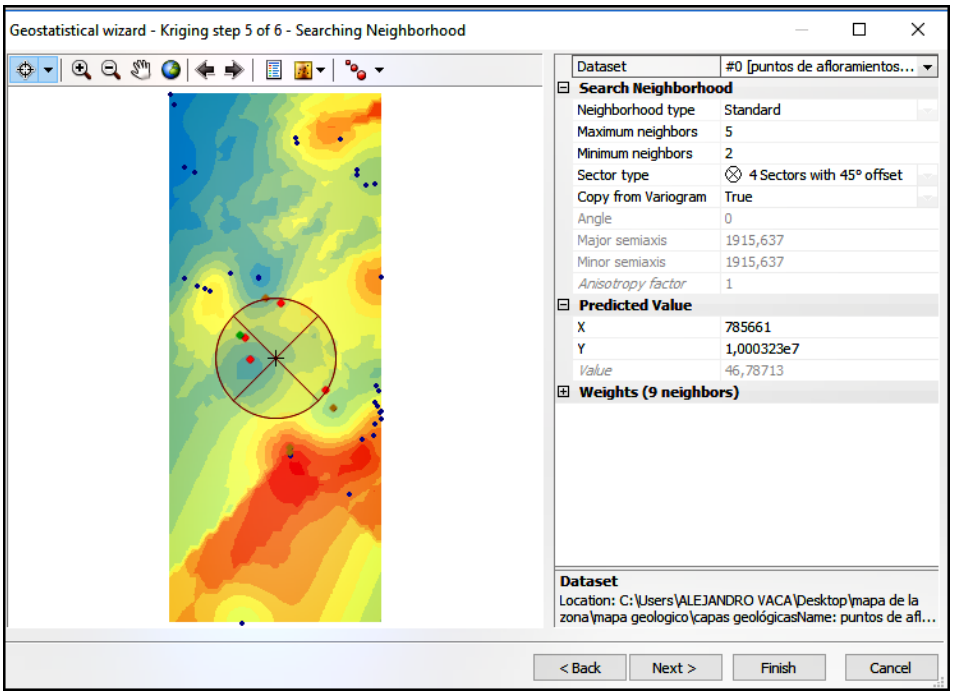

Figura 45. Vista previa del mapa geotécnico

Por último se obtiene una tabla con la medida, la predicción y valores de errores obtenidos en cada lugar de la zona, ver “Figura 46”.

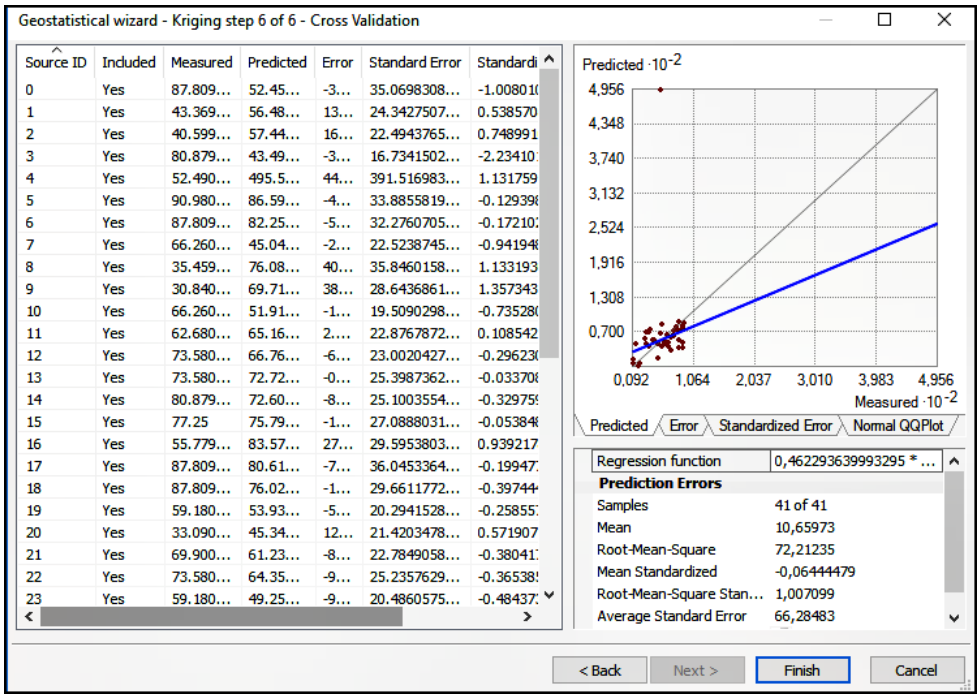

Figura 46. Resumen del análisis geoestadístico

Una vez terminado todos los pasos anteriores, obtenemos la superficie de predicción, en donde podremos observar cómo está distribuido el RQD dentro de la zona de estudio y así analizar este parámetro geomecánico, ver “Figura 47”.

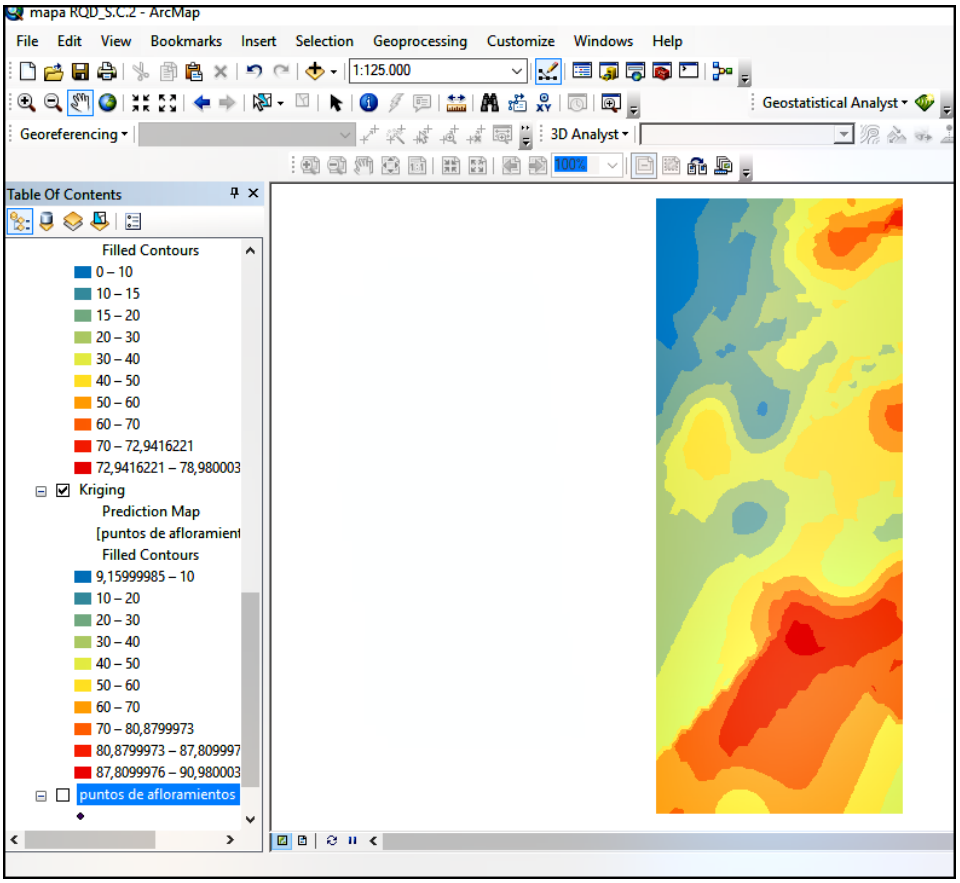

Figura 47. Mapa Geotécnico creado en Arc Gis.

2.9 Método para realizar el Mapa de Susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad se construyó en el programa ArcGis, a través de la correlación del mapa de pendientes y el mapa geotécnico.

Para poder relacionar estos dos mapas, se ubicara un peso que interprete la condición de cada zona, por ejemplo si tenemos una pendiente suave (0-8º) esta zona tendrá un valor de 1 (peso), y si tenemos una pendiente fuerte (>75º) entonces el valor del peso aumentará según su máximo límite, en este caso es 5. De igual forma se ubicará el valor de peso para cada zona del mapa Geotécnico y después se realizará la correlación para poder construir el mapa de susceptibilidad.

El método 2.7 explica cómo construir el mapa geotécnico, aquí se explica cómo obtener el mapa de pendientes. El primer paso es tener un Modelo digital de Elevación de la zona (DEM), para poder obtener el mapa de pendientes en ArcGis, se utiliza la herramienta Raster Surface, ver “Figura 48”.

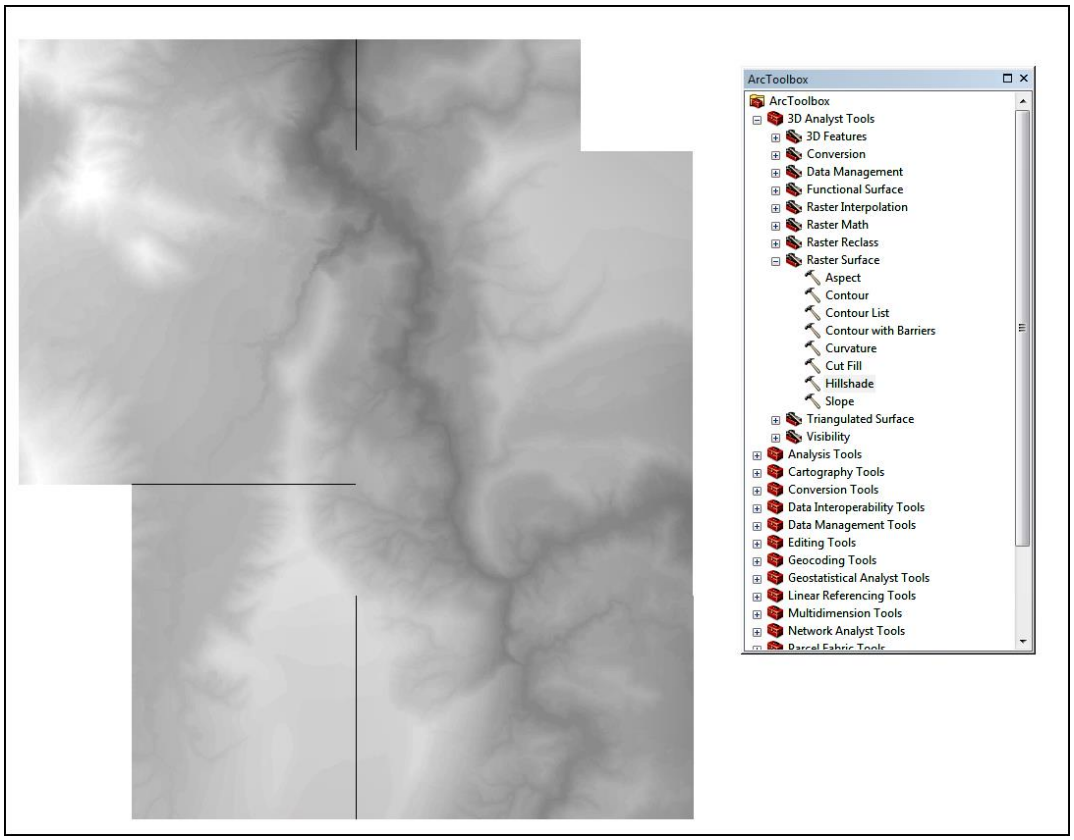

Figura 48. Mapa de sombras de la zona de San Antonio de Pichincha - Perucho

Al aplicar esta herramienta de Slope podremos observar la distribución de las pendientes en la zona de estudio, ver “Figura 49”.

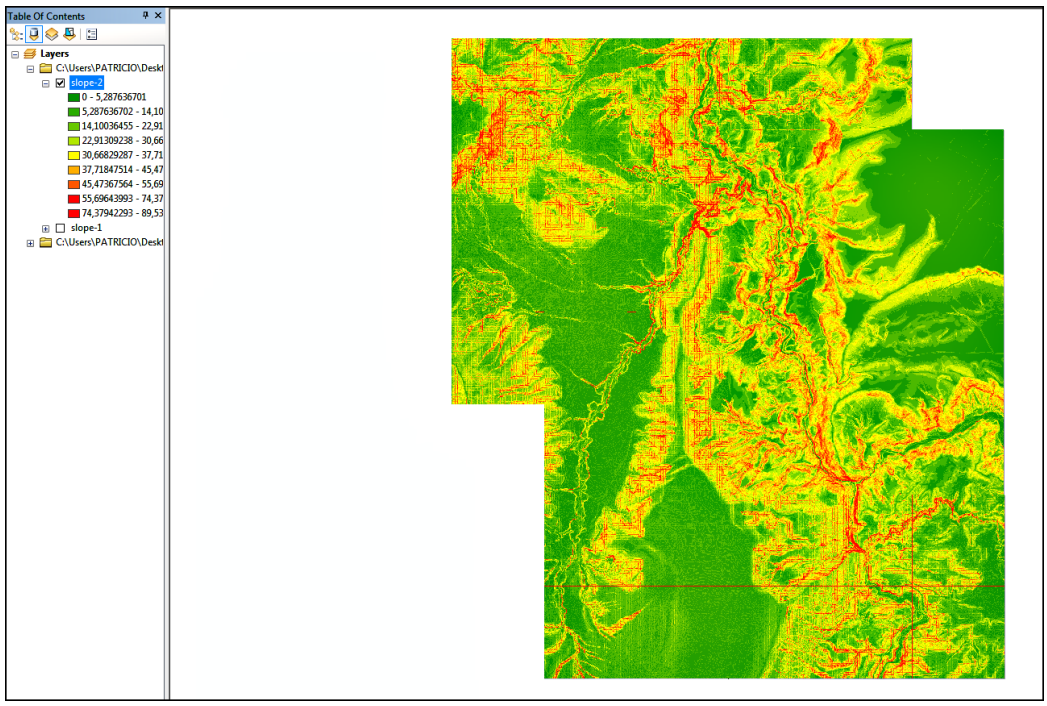

Figura 49. Mapa de pendientes de la zona de San Antonio de Pichincha - Perucho

Una vez obtenido los dos mapas, se procede a interponerlos a través de una álgebra de mapas (suma) que se realiza con la herramienta Spatial Analyst y luego utilizar Raster Calculator para ubicar una fórmula de interpretación y así obtener el mapa de susceptibilidad, ver “Figura 50”

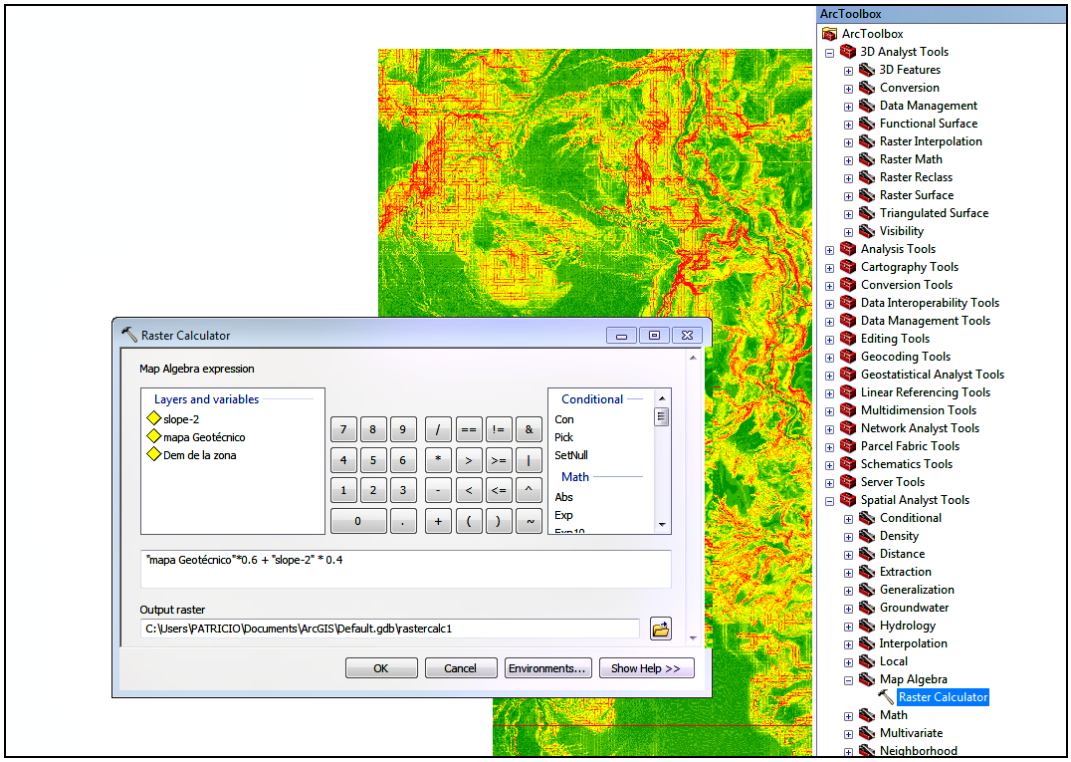

Figura 50. Cálculo para obtener el mapa de Susceptibilidad

En la “Figura 50”, se observa la calculadora de rasters que permite obtener el mapa de susceptibilidad a Fenómenos de Remoción en Masa, como se puede observar se ubica un porcentaje a cada mapa pero que la suma de los dos resulte 1, por ejemplo el mapa geotécnico tendrá un porcentaje de 0,6 por ser más complejo y el mapa de pendientes tendrá un porcentaje 0,4 y así obtendremos el mapa final.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Caracterización de los macizos rocosos (RMR)

A continuación se presenta una ficha “Tabla 22” con la caracterización general de cada macizo rocoso que se encontró en la zona de San Antonio de Pichincha – Perucho, las demás fichas serán ubicadas en la parte de anexos para su respectiva observación.

Tabla 22. Ficha que indica la caracterización general de los macizos rocosos, ejemplo del afloramiento P1.

Proyecto: Estabilidad de macizos rocosos en la zona de San Antonio - Perucho **Realizado por:** Alejandro Vaca **UTM:** (X:0789022 Y:10005830) **Fecha:** 16/12/2016 **Localización:** A 1,5 km de Alchipichi vía Puéllaro								**Altura: 2200 m** **Hoja/plano:** P1 **Foto:** DSC07566
LITOLOGÍA	**Observación:** Andesita Básica				**POTENCIA:** 4,5 metros	**FORMACIÓN Y EDAD:** Fm. Mojanda		
FORMACIONES SUPERFICIALES ESTRUCTURA	**Observación:** Se observan una capa de brecha volcánica			**MORFOLOGÍA:** Se presenta discordante con el macizo rocoso.		**ESPESOR:** 20 metros		
FRACTURACIÓN	BLOQUES Jv Juntas/m3		Muy grandes <1	Grandes 1-3	Medios 3-10	Pequeños 10-30	M.Pequeños>30	M.brechificado >60
RESISTENCIA DE MATRIZ ROCOSA	Extremadamente blanda (uña) 0		M.Blanda (Navaja) 1	Blanda (punta martillo) 2	Media (1 golpe de martillo) 3	Dura (2 Golpes de Martillo) 4	M. Dura (varios golpes) 5	Extrem. Dura (Solo raya con martillo)6
GRADOS DE METEORIZACIÓN	I Sana	II Algo meteorizada	III Medianamente meteorizado	IV Muy meteorizado	V Completamente meteorizado		VI Suelo residual	
HIDROGEOLOGÍA	Sin presencia de agua	Seco (señales de agua)	Húmedo	Goteos	Flujo		Caudal estimado	
RESISTENCIA ESCLERÓMETRO(MPa)	40,30 Mpa	> 250 (15)	250-100 (12)	100-50 (7)	50-25 (4)	25-5 (2)	5-1 (1)	<1 (0)
αs=Dirección del talud	N25°E (295°/46°azimut de buzamiento)				**βs= buzamiento del talud**	46°NW		
Talud Natural(15)		Precorte(10)		Voladura suave(8)		Excavación mecánica(0)		Voladura deficiente(-8)

ESQUEMA

Figura 51. Esquema del afloramiento P1, con líneas de diferentes colores se representan las familias que son visibles en la imagen.

Una vez realizada la caracterización general, se procedió a realizar un análisis más detallado de cada macizo rocoso, en donde participa diferentes parámetros geomecánicos relacionados con el número de discontinuidades y sus condiciones, presencia de agua, y resistencia a la compresión simple.

Los parámetros fueron propuestos por Bieniawski en 1983, se realizaron pequeñas modificaciones y se obtuvo un valor de clasificación Geomecánica para cada macizo rocoso.

A continuación se exhibe las tablas con los resultados que se obtuvieron en este estudio.

Tabla 23. Resultados obtenidos en la caracterización de los macizos rocosos.

Estación N°		N° de Afloramiento	PUNTAJE	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
		Tipo de plano		RP	RV	RP	RP	RP	RP	RP	RP	RP	RV	RP	RV	RP	RP	RV
		Dirección de Buzamiento(°)		260	005	170	185	325	250	140	125	025	060	040	090	260	295	300
		Buzamiento (°)		45	86	87	62	42	50	39	58	54	62	54	60	50	50	60
RQD = 100 e-0.1λ (1 + 0.1λ)		90-100%	20						■									
		75-90%	17	■			■			■								■
		50-75%	13					■			■			■	■	■	■	
		25-50%	6		■	■						■	■					
		<25%	3															
Separación entre diaclasas		>2m	20															
		0.6 - 2m	15	■				■	■	■								■
		0.2 -0.6 m	10														■	
		0.06 - 0.2 m	8		■	■	■						■	■	■	■		
		< 0.06m	5								■	■						
Condiciones de Discontinuidad	Longitud de discontinuidad	<1m	6		■													
		1 - 3 m	4								■		■		■			
		3 - 10 m	2	■		■	■	■	■			■						■
		10 - 20 m	1							■				■		■	■	
		>20 m	0															
	Abertura	Nada	6															
		<0.1 mm	5															
		0.1 - 1 mm	3															■
		1- 5 mm	1	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■			
		>5mm	0											■		■	■	
	Rugosidad	Muy rugosa (Rugosa Escalonada)	6	■														
		Rugosa (Lisa Escalonada y Rugosa Ondulada)	5										■					
		Ligera. Rugosa (Pulida Escalonada y Lisa Ondulada)	3		■	■	■	■	■	■				■			■	■
		Lisa (Pulida Ondulada y Lisa Plana)	1								■	■			■	■		
		Espejo de falla (Pulida Plana)	0															
	Relleno	Ninguno	6															
		Relleno duro <5mm	4	■	■				■					■		■		
		Relleno duro > 5 mm	2										■					
		Relleno blando <5mm	2			■	■	■		■	■	■			■		■	■
		Relleno blando >5mm	0															
	Alteración	Inalterada	6				■											
		Ligeramente alterada	5	■	■			■	■	■								
		Moderadamente alterado	3			■						■	■	■		■	■	■
		Muy alterado	1								■				■			
		Descompuesto	0															
Agua Freática		Seco	15	■	■	■		■	■		■	■						
		Ligeramente húmedo	10				■			■				■		■	■	
		Húmedo	7										■		■			■
		Goteando	4															
		Agua Fluyendo	0															
Resistencia a la compresión simple		>250	15															
		250-100	12	■					■	■								
		100-50	7				■	■					■	■		■	■	■
		50-25	4		■	■									■			
		25-5	2															
		5-1	1								■	■						
		<1	0															
RMR básico				77	52	44	56	62	77	66	43	43	50	49	45	48	50	59

La sumatoria de todos los puntajes anteriores indican la calidad del macizo rocoso (RMR básico), el cual permite calificar al macizo desde muy buena calidad hasta muy mala, aquí se observaran todos los parámetros geomecánicos de una forma sencilla y bajo costo.

Tabla 24. Resultados obtenidos en la caracterización de los macizos rocosos.

Estación N°		N° de Afloramiento	PUNTAJE	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30
		Tipo de plano		RV	RV	RV	RV	RP	RP	RV	RV	RP	RP	RP	RP	RP	RV	RP
		Dirección de Buzamiento(°)		350	075	320	325	060	050	092	280	135	330	030	095	230	245	020
		Buzamiento (°)		55	50	40	50	40	70	72	70	78	60	70	55	20	70	20
RQD = 100 e-0.1λ (1 + 0.1λ)		90-100%	20															
		75-90%	17	■		■	■									■		■
		50-75%	13		■			■		■	■	■	■		■			
		25-50%	6						■					■			■	
		<25%	3															
Separación entre diaclasas		>2m	20															
		0.6 - 2m	15				■											
		0.2 -0.6 m	10	■		■				■						■	■	
		0.06 - 0.2 m	8		■			■			■	■		■	■			
		< 0.06m	5						■				■					■
Condiciones de Discontinuidad	Longitud de discontinuidad	<1m	6											■				
		1 - 3 m	4					■			■	■	■				■	■
		3 - 10 m	2		■	■			■						■	■		
		10 - 20 m	1							■								
		>20 m	0	■			■											
	Abertura	Nada	6															
		<0.1 mm	5															
		0.1 - 1 mm	3							■								
		1- 5 mm	1		■			■	■			■	■		■	■	■	
		>5mm	0	■		■	■				■			■				■
	Rugosidad	Muy rugosa (Rugosa Escalonada)	6							■								
		Rugosa (Lisa Escalonada y Rugosa Ondulada)	5															
		Ligera. Rugosa (Pulida Escalonada y Lisa Ondulada)	3	■	■	■			■		■	■	■			■		
		Lisa (Pulida Ondulada y Lisa Plana)	1				■	■						■	■		■	■
		Espejo de falla (Pulida Plana)	0															
	Relleno	Ninguno	6			■			■	■			■				■	
		Relleno duro <5mm	4		■		■	■			■							
		Relleno duro > 5 mm	2															
		Relleno blando <5mm	2	■								■			■	■		
		Relleno blando >5mm	0											■				■
	Alteración	Inalterada	6															
		Ligeramente alterada	5					■	■		■							
		Moderadamente alterado	3	■	■	■	■					■						
		Muy alterado	1							■			■	■	■	■		■
		Descompuesto	0														■	
Agua Freática		Seco	15		■			■	■	■	■							
		Ligeramente húmedo	10	■		■						■	■					
		Húmedo	7				■							■	■	■	■	■
		Goteando	4															
		Agua Fluyendo	0															
Resistencia a la compresión simple		>250	15															
		250-100	12	■	■											■		
		100-50	7				■	■				■		■	■			■
		50-25	4			■			■		■		■					
		25-5	2							■							■	
		5-1	1															
		<1	0															
RMR básico				57	61	55	54	58	47	57	56	51	47	36	42	55	37	42

Los valores del RQD se obtuvo mediante el grado de fracturación del macizo rocoso y los resultados podemos observarlo en la “Tabla 26”.

Tabla 25. Resultados obtenidos en la caracterización de los macizos rocosos.

Estación N°		N° de Afloramiento	PUNTAJE	P31	P32	P33	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41
		Tipo de plano		RP	RV	RP	RV	RP	RP	RP	RP	RV	RP	RP
		Dirección de Buzamiento(°)		110	315	150	075	080	190	295	212	328	049	135
		Buzamiento (°)		60	80	70	80	65	81	50	75	55	75	21
RQD = 100 e-0.1λ (1 + 0.1λ)		90-100%	20											
		75-90%	17											
		50-75%	13											
		25-50%	6											
		<25%	3											
Separación entre diaclasas		>2m	20											
		0.6 - 2m	15											
		0.2 -0.6 m	10											
		0.06 - 0.2 m	8											
		< 0.06m	5											
Condiciones de Discontinuidad	Longitud de discontinuidad	<1m	6											
		1 - 3 m	4											
		3 - 10 m	2											
		10 - 20 m	1											
		>20 m	0											
	Abertura	Nada	6											
		<0.1 mm	5											
		0.1 - 1 mm	3											
		1- 5 mm	1											
		>5mm	0											
	Rugosidad	Muy rugosa (Rugosa Escalonada)	6											
		Rugosa (Lisa Escalonada y Rugosa Ondulada)	5											
		Ligera. Rugosa (Pulida Escalonada y Lisa Ondulada)	3											
		Lisa (Pulida Ondulada y Lisa Plana)	1											
		Espejo de falla (Pulida Plana)	0											
	Relleno	Ninguno	6											
		Relleno duro <5mm	4											
		Relleno duro > 5 mm	2											
		Relleno blando <5mm	2											
		Relleno blando >5mm	0											
	Alteración	Inalterada	6											
		Ligeramente alterada	5											
		Moderadamente alterado	3											
		Muy alterado	1											
		Descompuesto	0											
Agua Freática		Seco	15											
		Ligeramente húmedo	10											
		Húmedo	7											
		Goteando	4											
		Agua Fluyendo	0											
Resistencia a la compresión simple		>250	15											
		250-100	12											
		100-50	7											
		50-25	4											
		25-5	2											
		5-1	1											
		<1	0											
RMR básico				52	54	47	35	46	57	64	33	34	33	37

Mientras que los valores a la resistencia a la compresión simple se obtuvieron mediante el esclerómetro aplicado directamente en el campo y otros en el laboratorio, también se complementó con Ensayos de Carga Puntual y Ensayos de Compresión Simple de las muestras escogidas y disponibles para realizarse en ellas estos ensayos mencionados.

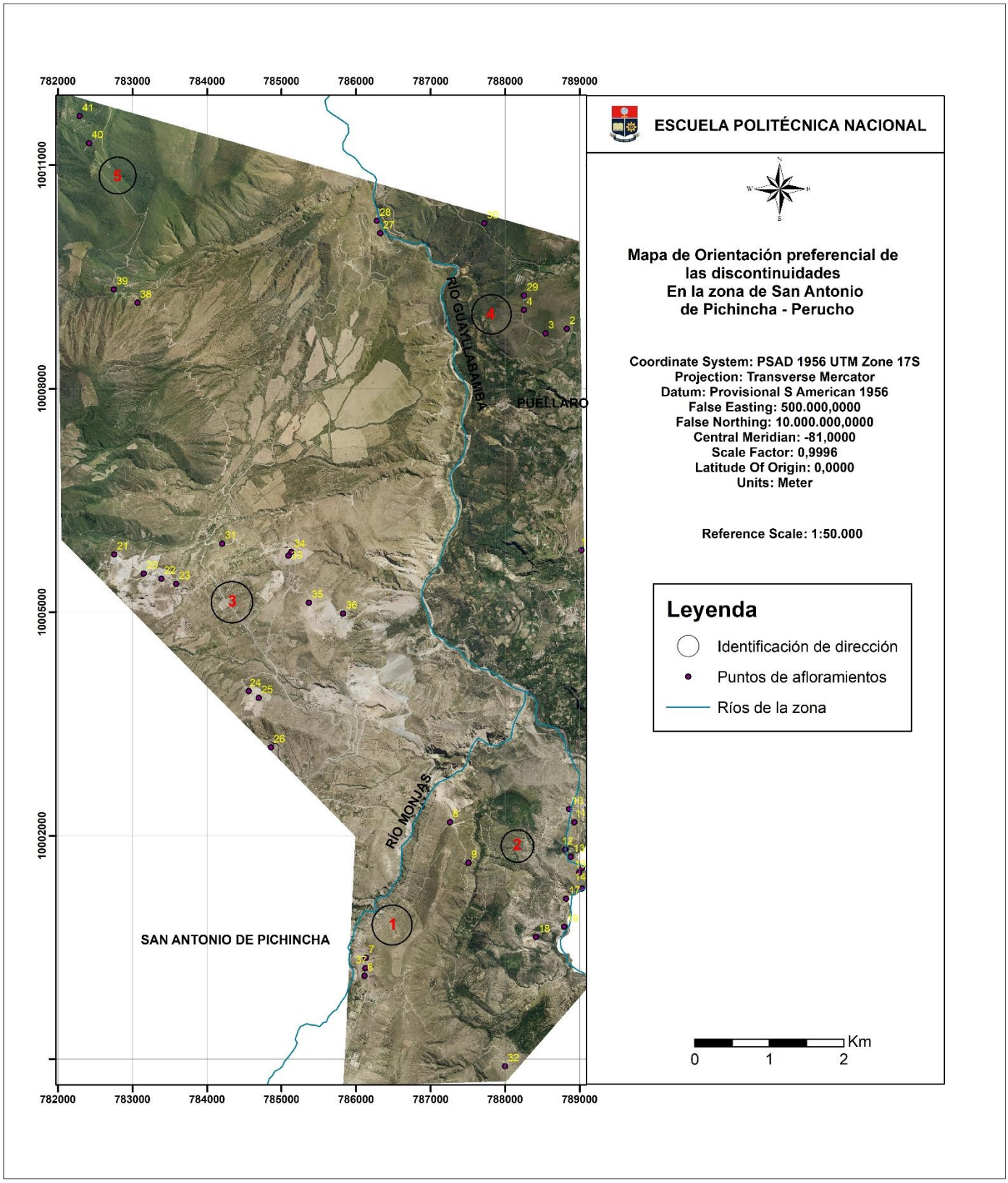

Figura 52. Identificación de la orientación preferencial de las discontinuidades, delimitadas por la geomorfología de la zona.

En la “Figura 52” se procederá a identificar la orientación preferencial de las discontinuidades a través de un diagrama de rosetas, en una específica zona, la cual se encuentra marcada con un círculo y número en la anterior figura.

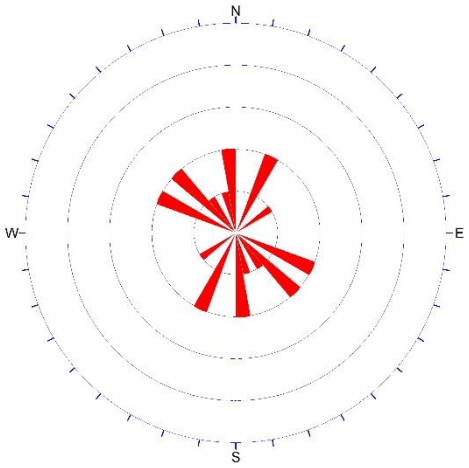

Figura 53. Diagrama de rosetas, ubicación 1, afloramientos (37, 6, 7).

Dirección preferencial N-S y N50°W.

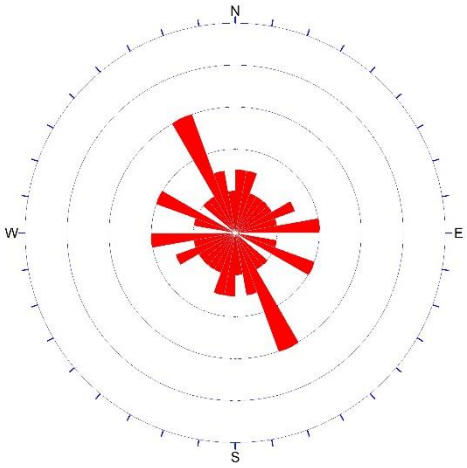

Figura 54. Diagrama de rosetas, ubicación 2, afloramientos (8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,32)

Dirección preferencial N25°W

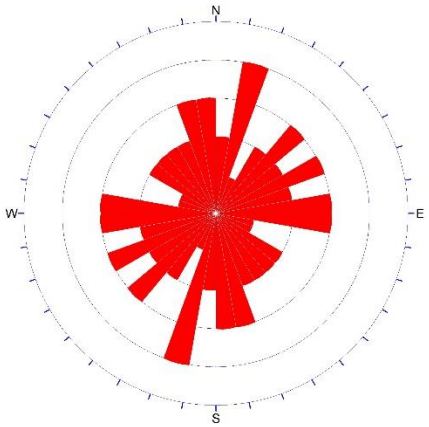

Figura 55. Diagrama de rosetas, ubicación 3, afloramientos (20,21,22,23,24,25,26,31,33,34,35,36)
Dirección preferencial N10°E

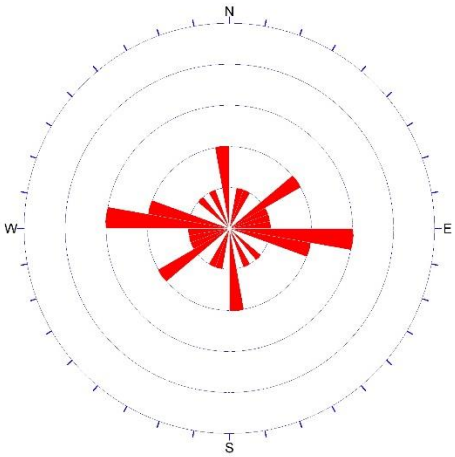

Figura 56. Diagrama de rosetas, ubicación 4, afloramientos (1,2,3,4,29,30)
Dirección preferencial E-W

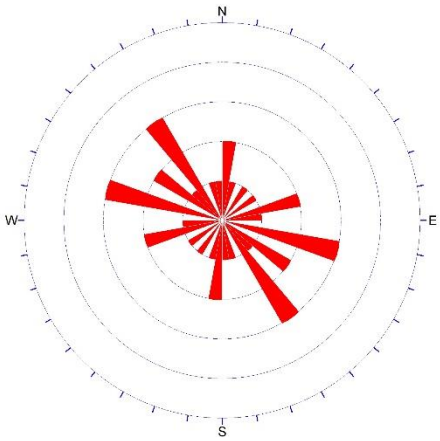

Figura 57. Diagrama de rosetas, ubicación 4, afloramientos (27,28,38,39,40,41)
Dirección preferencial N30°W

3.2 Resultados obtenidos del RQD

Utilizando la “Ecuación 6”, se obtuvo el índice de calidad de roca de cada macizo.

Tabla 26. Índice de calidad de roca

N° de Afloramiento	λ = N° de fisuras/ espacio	RQD=100e^(-0.1λ) x (0,1λ+1)
1	6	87,81
2	19	43,37
3	20	40,60
4	8	80,88
5	16	52,49
6	5	90,98
7	6	87,81
8	12	66,26
9	22	35,46
10	24	30,84
11	12	66,26
12	13	62,68
13	10	73,58
14	10	73,58
15	8	80,88
16	9	77,25
17	15	55,78
18	6	87,81
19	6	87,81
20	14	59,18
21	23	33,09
22	11	69,90
23	10	73,58
24	14	59,18
25	17	49,32
26	25	28,73
27	16	52,49
28	6	87,81
29	23	33,09
30	8	80,88
31	15	55,78
32	9	77,25
33	17	49,32
34	35	13,59
35	24	30,84
36	11	69,90
37	8	80,88
38	30	19,91
39	40	9,16
40	32	17,12
41	40	9,16

3.3 Resultados del Ensayo de Carga Puntual

Tabla 27. Datos de cada muestra y carga que se proporcionó a cada una.

Muestra	Alto (cm) D	Ancho (cm) W	Profundidad PR (cm)	Área de Pistón, medido en la máquina (cm^2)	P (PSI)	P(N/cm^2)	Carga (KN)
P7	2,9	6	6,3	14,426	1150	792,9	11,4
P7	3,1	5,8	6	14,426	1300	896,3	12,9
P5	3,25	4,6	6,4	14,426	1000	689,5	9,9
P5	3,2	5,8	6,3	14,426	800	551,6	8,0
P5	3	5,6	6,7	14,426	850	586,1	8,5
P6	3,15	5,8	5,8	14,426	1700	1172,1	16,9
P6	3,2	5	6	14,426	1900	1310,0	18,9
P9	2,85	4,4	5,7	14,426	150	103,4	1,5
P9	3,1	4,8	5,6	14,426	150	103,4	1,5
P23	3,3	5,7	6,2	14,426	400	275,8	4,0
P23	3,2	5,9	6	14,426	350	241,3	3,5
P1	4,1	8,8	9,5	14,426	2800	1930,5	27,8
P1	4,85	8,7	9,5	14,426	3000	2068,4	29,8
P17	3,75	5,7	8	14,426	2700	1861,6	26,9
P20	3	3,9	5,8	14,426	750	517,1	7,5
P20	3,5	5,4	5,6	14,426	750	517,1	7,5
P22	3	6	6,3	14,426	150	103,4	1,5
P22	3,5	6,3	6,6	14,426	100	68,9	1,0
P24	3,5	6	6	14,426	650	448,2	6,5
P24	5,6	5,9	6	14,426	1100	758,4	10,9
P25	3,1	5,5	5,8	14,426	300	206,8	3,0
P25	2,7	6,3	6,7	14,426	800	551,6	8,0
P26	3,2	5,5	6,6	14,426	650	448,2	6,5
P2	3,3	4,6	5	14,426	150	103,4	1,5
P2	3,15	6	6	14,426	300	206,8	3,0
P28	3,25	4,2	6,7	14,426	1250	861,8	12,4
P28	3,3	5,2	6,2	14,426	1300	896,3	12,9
P28	3,15	5,7	6,3	14,426	1000	689,5	9,9
P30	3,1	5,6	6,2	14,426	700	482,6	7,0
P32	4,2	5,4	5,4	14,426	600	413,7	6,0
P32	3,1	5,9	6,3	14,426	500	344,7	5,0
P33	3	5,75	7	14,426	200	137,9	2,0
P35	2,5	4,7	5,6	14,426	700	482,6	7,0
P35	3,5	5,1	6,3	14,426	850	586,1	8,5
P3	3	5,75	6,5	14,426	250	172,4	2,5
P3	5,1	5,6	7,3	14,426	200	137,9	2,0
P3	3,25	4,4	4,6	14,426	250	172,4	2,5
P40	3,6	5,1	6,1	14,426	400	275,8	4,0
P40	4	5	6	14,426	500	344,7	5,0
P4	3	5	5,7	14,426	750	517,1	7,5
P4	3,4	6,2	6,2	14,426	800	551,6	8,0
P41	3,4	4,6	4,9	14,426	500	344,7	5,0
P41	3,8	5,2	5	14,426	700	482,6	7,0
P12	3,6	5,5	7,6	14,426	500	344,7	5,0
P12	3,7	6	6,1	14,426	675	465,4	6,7
P27	4	5	6,1	14,426	700	482,6	7,0
P27	3,6	5	6,5	14,426	700	482,6	7,0

En la “Tabla 27” consta de 47 muestras de las cuales pertenecen a 24 afloramientos, se observa sus medidas, la carga fue proporcionada a través de dos pistones y obtenida mediante un manómetro.

Tabla 28. Factor de corrección (F) e índice de carga puntual (Is)

Muestra	Diámetro (cm^2)	Is, Mpa	F	Is(50)Mpa
P7	22,2	5,2	0,97	5,0
P7	22,9	5,6	0,98	5,5
P5	19,0	5,2	0,94	4,9
P5	23,6	3,4	0,99	3,3
P5	21,4	4,0	0,97	3,8
P6	23,3	7,3	0,98	7,2
P6	20,4	9,3	0,95	8,9
P9	16,0	0,9	0,90	0,8
P9	18,9	0,8	0,94	0,7
P23	23,9	1,7	0,99	1,6
P23	24,0	1,4	0,99	1,4
P1	45,9	6,1	1,15	7,0
P1	53,7	5,6	1,19	6,6
P17	27,2	9,9	1,02	10,1
P20	14,9	5,0	0,89	4,5
P20	24,1	3,1	0,99	3,1
P22	22,9	0,7	0,98	0,6
P22	28,1	0,4	1,03	0,4
P24	26,7	2,4	1,02	2,5
P24	42,1	2,6	1,12	2,9
P25	21,7	1,4	0,97	1,3
P25	21,7	3,7	0,97	3,6
P26	22,4	2,9	0,98	2,8
P2	19,3	0,8	0,94	0,7
P2	24,1	1,2	0,99	1,2
P28	17,4	7,2	0,92	6,6
P28	21,8	5,9	0,97	5,7
P28	22,9	4,4	0,98	4,3
P30	22,1	3,1	0,97	3,1
P32	28,9	2,1	1,03	2,1
P32	23,3	2,1	0,98	2,1
P33	22,0	0,9	0,97	0,9
P35	15,0	4,7	0,89	4,1
P35	22,7	3,7	0,98	3,6
P3	22,0	1,1	0,97	1,1
P3	36,4	0,5	1,09	0,6
P3	18,2	1,4	0,93	1,3
P40	23,4	1,7	0,99	1,7
P40	25,5	2,0	1,00	2,0
P4	19,1	3,9	0,94	3,7
P4	26,8	3,0	1,02	3,0
P41	19,9	2,5	0,95	2,4
P41	25,2	2,8	1,00	2,8
P12	25,2	2,0	1,00	2,0
P12	28,3	2,4	1,03	2,4
P27	25,5	2,7	1,00	2,7
P27	22,9	3,0	0,98	3,0

Resultados obtenidos a través de la “Ecuación 7” y la descripción del método 2.2.2

Tabla 29. Valores de cargas puntuales correlacionadas con valores de resistencia a la compresión simple.

Muestra	Kassim and Mohammad (2007) Mpa	Sabatakakis et al. (2008) Mpa	Wei liang et al.(2015)Mpa	González Vallejo (2002)Mpa
P7	72,7	120,6	122,6	115,6
P7	80,1	155,0	135,1	127,4
P5	71,1	117,9	121,0	113,0
P5	48,1	79,8	61,5	76,5
P5	55,2	91,6	77,8	87,8
P6	103,4	200,3	174,5	164,5
P6	128,1	248,1	216,2	203,8
P9	12,1	11,0	7,5	19,4
P9	10,8	9,6	6,3	17,0
P23	23,9	21,4	19,7	37,8
P23	20,8	18,7	16,1	33,0
P1	100,6	194,7	169,6	159,9
P1	95,4	184,7	161,0	151,7
P17	145,4	281,6	245,4	231,3
P20	64,5	107,0	101,9	102,5
P20	44,5	73,8	53,8	70,7
P22	9,6	8,3	5,2	14,7
P22	6,2	4,7	2,6	8,4
P24	35,6	58,9	37,1	56,5
P24	42,3	70,2	49,5	67,2
P25	19,3	17,3	14,4	30,6
P25	51,5	85,4	68,9	81,8
P26	40,8	67,6	46,5	64,7
P2	10,7	9,5	6,2	16,8
P2	17,9	16,0	12,8	28,3
P28	95,3	184,6	160,8	151,6
P28	83,1	160,8	140,1	132,1
P28	61,7	102,3	94,3	98,1
P30	44,4	73,5	53,5	70,5
P32	30,9	51,2	29,7	49,1
P32	30,5	50,4	28,9	48,3
P33	12,5	11,4	8,0	20,2
P35	60,0	99,5	89,8	95,4
P35	52,7	87,4	71,7	83,7
P3	16,0	14,3	10,9	25,3
P3	9,0	7,7	4,7	13,7
P3	18,5	16,5	13,4	29,2
P40	24,3	21,8	20,3	38,6
P40	28,4	25,5	25,9	45,1
P4	53,2	88,2	72,9	84,6
P4	43,6	72,3	52,0	69,3
P41	34,4	56,9	35,1	54,6
P41	40,1	66,5	45,3	63,7
P12	28,7	25,7	26,2	45,5
P12	35,4	58,6	36,8	56,2
P27	39,8	65,9	44,6	63,1
P27	43,1	71,5	51,1	68,5

Se construyeron 1, 2 o 3 bloques para 24 afloramientos seleccionados de la zona de estudio, dando un total de 47 bloques donde se realizó este tipo de ensayo.

En la “Tabla 29” se puede observar los valores del índice de carga puntual correlacionados con la resistencia a la compresión simple. Diferentes autores propusieron distintas relaciones con índice de carga puntual, la metodología 2.2.2 ubicado en el capítulo 2 explica los resultados obtenidos.

3.4 Resultados del Ensayo de Compresión Simple

Tabla 30. Descripción de la muestra.

Muestra N°	Color	Ancho (cm)	Largo (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga Máx (Ton)
P40	gris-verde	5,27	5,21	5,23	405	14,453
P40	gris-verde	5,15	5,24	5,22	403,7	14,748
P40	gris-verde	5,165	5,175	5,23	395,9	15,937
P41	café	5,235	5,135	5,275	393,8	8,29
P41	café	4,69	5,135	5,275	386,4	11,03
P21	gris	5,22	5,235	5,215	344,4	16,063
P21	gris	5,235	5,2	5,25	344,1	16,239
P17	verde	5,185	5,22	5,2	388,1	24,78
P20	café claro	5,165	5,205	5,18	330,5	16,07
P20	café claro	5,2	5,235	5,235	333,3	16,568
P20	café claro	5,19	5,215	5,18	331,1	17,808

Tabla 31. Valores de resistencia a la compresión simple

Muestra N°	Carga Máx (KN)	ÁREA (cm2)	R.C.S (Mpa)
P40	141,7	27,4567	51,62
P40	144,6	26,986	53,59
P40	156,3	26,728875	58,47
P41	81,3	26,881725	30,24
P41	108,2	24,08315	44,91
P21	157,5	27,3267	57,65
P21	159,3	27,222	58,50
P17	243,0	27,0657	89,79
P20	157,6	26,883825	58,62
P20	162,5	27,222	59,69
P20	174,6	27,06585	64,52

Los valores de la resistencia a la compresión simple se obtiene de la carga proporcionada (KN) sobre el área de la muestra (cm^2). Es explicado en la metodología 2.2.3 y el valor corregido a través de una ecuación explicada en la misma metodología.

3.4.1 Correlación entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple

La "Figura 58" muestra la relación que existe entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión, se tomó cinco muestras existentes de la "Tabla 31" y se correlacionó con los datos de la "Tabla 28" para poder interpretar la relación que existe entre estos dos métodos.

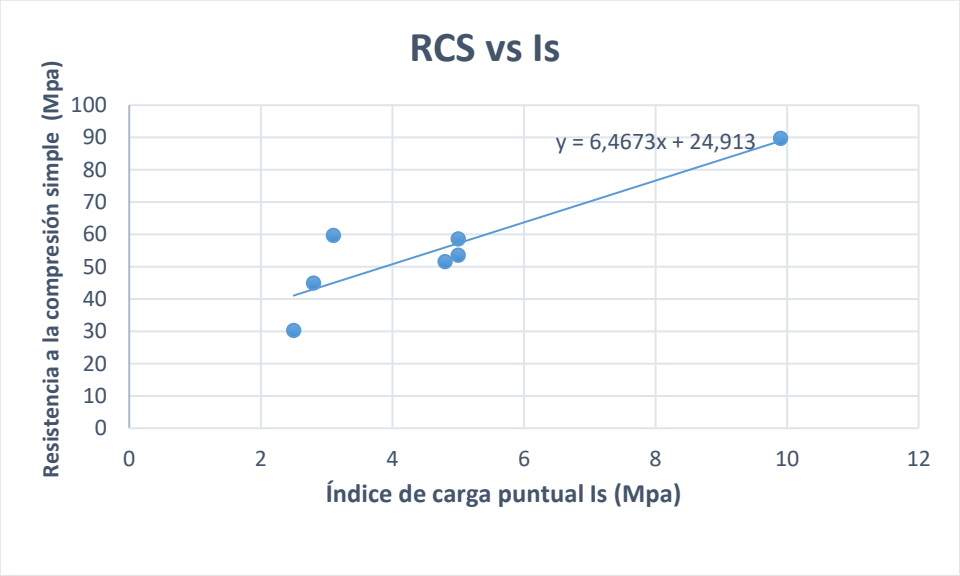

Figura 58. Correlación entre índice de carga puntual y compresión simple.

$$y = 6{,}4673x + 24{,}913$$

Ecuación 14.

La línea de tendencia de la "Figura 58" proporciona la "Ecuación 14" la cual permite conocer la relación que existe entre el índice de carga puntual y la resistencia a la compresión simple en este estudio. Muchos autores proponen diferentes ecuaciones "Método 2.2.2" que permiten visualizar esta correlación, existen varias interpretaciones ya que la resistencia es un factor que continuamente cambia según su posición ya sea por su composición o las diferentes condiciones físicas que presenta cada macizo rocoso. Por lo que se recomienda utilizar la ecuación que más se adapta a su ambiente para poder obtener mejores resultados.

3.5 Resultados de la clasificación de los macizos rocosos (RMR)

Tabla 32. Clasificación de los macizos rocosos

N° de Afloramiento	Puntaje	Calidad	Clase
P1	77	II	buena
P2	52	III	media
P3	44	III	media
P4	56	III	media
P5	62	II	buena
P6	77	II	buena
P7	66	II	buena
P8	43	III	media
P9	43	III	media
P10	50	III	media
P11	49	III	media
P12	45	III	media
P13	48	III	media
P14	50	III	media
P15	59	III	media
P16	57	III	media
P17	61	II	buena
P18	55	III	media
P19	54	III	media
P20	58	III	media
P21	47	III	media
P22	57	III	media
P23	56	III	media
P24	51	III	media
P25	47	III	media
P26	36	IV	mala
P27	42	III	media
P28	55	III	media
P29	37	IV	mala
P30	42	III	media
P31	52	III	media
P32	54	III	media
P33	47	III	media
P34	35	IV	mala
P35	46	III	media
P36	57	III	media
P37	64	II	buena
P38	33	IV	mala
P39	34	IV	mala
P40	33	IV	mala
P41	37	IV	mala

Clasificación obtenida a través del puntaje final del RMR básico

3.6 Resultados obtenidos en la clasificación (SMR)

Tabla 33. Clasificación SMR

N° Afloramiento	Factor de Ajuste					Puntaje del SRM
	Orientación de las juntas				Método de Excavación	
	F1	F2	F3	Total	F4	
P1	0,15	0,85	-50	-6,4	-8	63
P2	0,15	1	-25	-3,8	0	48
P3	0,70	1	0	0	15	59
P4	0,15	1	-6	-0,9	15	70
P5	0,15	0,85	-60	-7,7	15	69
P6	0,70	1	-60	-42	-8	27
P7	0,15	0,85	-60	-7,7	-8	50
P8	0,15	1	-60	-9	0	34
P9	0,15	1	-60	-9	15	49
P10	0,85	1	-25	-21	8	37
P11	0,15	1	-50	-7,5	15	57
P12	0,85	1	-6	-5,1	0	40
P13	0,40	1	-60	-24	15	39
P14	0,40	1	-50	-20	15	45
P15	0,15	1	-25	-3,8	15	70
P16	0,85	1	0	0	8	65
P17	0,40	1	-25	-10	8	59
P18	0,15	1	-6	-0,9	0	54
P19	0,15	1	-25	-3,8	15	65
P20	0,40	0,85	-60	-20	8	46
P21	0,70	1	-60	-42	8	13
P22	0,40	1	-25	-10	-8	39
P23	0,15	1	-25	-3,8	8	60
P24	0,15	1	-6	-0,9	-8	42
P25	0,40	1	-50	-20	-8	19
P26	0,15	1	-50	-7,5	15	44
P27	0,40	1	-60	-24	8	26
P28	0,40	0,4	-60	-9,6	-8	37
P29	0,15	1	-25	-3,8	-8	25
P30	0,40	0,4	-60	-9,6	15	47
P31	0,15	1	-60	-9	-8	35
P32	0,15	1	-25	-3,8	15	65
P33	0,40	1	-50	-20	8	35
P34	0,40	1	-25	-10	8	33
P35	0,85	1	-50	-43	8	12
P36	0,40	1	-6	-2,4	8	63
P37	0,85	1	-60	-51	8	21
P38	0,70	1	-25	-18	8	24
P39	0,40	1	-25	-10	0	24
P40	0,15	1	-50	-7,5	0	26
P41	0,15	0,4	-60	-3,6	0	33

Los resultados de la “Tabla 32” se obtuvieron mediante la “Metodología 2.4.2” descrita en el capítulo 2.

A través del puntaje (SMR), que se observa en la “Tabla 33”, se puede dar calificativo de estabilidad al talud y posibles medidas de contingencia.

Tabla 34. Clase de estabilidad a través del puntaje SMR.

Afloramiento	Puntaje (SMR)	Estabilidad	Clase
P1	62,625	Estable	II
P2	48,25	Parcial. Estable	III
P3	59	Parcial. Estable	III
P4	70,1	Estable	II
P5	69,35	Estable	II
P6	27	Inestable	IV
P7	50,35	Parcial. Estable	III
P8	34	Inestable	IV
P9	49	Parcial. Estable	III
P10	36,75	Inestable	IV
P11	56,5	Parcial. Estable	III
P12	39,9	Inestable	IV
P13	42	Parcial. Estable	III
P14	48	Parcial. Estable	III
P15	70,25	Estable	II
P16	65	Estable	II
P17	59	Parcial. Estable	III
P18	54,1	Parcial. Estable	III
P19	65,25	Estable	II
P20	45,6	Parcial. Estable	III
P21	13	Total. Inestable	V
P22	39	Inestable	IV
P23	60,25	Parcial. Estable	III
P24	42,1	Parcial. Estable	III
P25	19	Total. Inestable	V
P26	43,5	Parcial. Estable	III
P27	26	Inestable	IV
P28	37,4	Inestable	IV
P29	25,25	Inestable	IV
P30	47,4	Parcial. Estable	III
P31	35	Inestable	IV
P32	65,25	Estable	II
P33	35	Inestable	IV
P34	33	Inestable	IV
P35	11,5	Total. Inestable	V
P36	62,6	Estable	II
P37	21	Inestable	IV
P38	23,5	Inestable	IV
P39	24	Inestable	IV
P40	25,5	Inestable	IV
P41	33,4	Inestable	IV

3.7 Resultados de la clasificación del índice Q-slope

Tabla 35. Clasificación a través del índice Q-slope

INDICE Q Slope			N° de Afloramiento										
PARÁMETROS	Características	Puntaje	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
1. Calidad del testigo RQD(%)	Muy mala	0-25											
	Mala	25-50		43,4	40,6						35,5	30,8	
	Media	50-75					52,5			66,3			66,3
	Buena	75-90	87,8			80,9			87,8				
	Excelente	90-100						91					
2.Índice de diaclasado (Jn)	Roca masiva	0,5-1,0											
	1 familia de diaclasas	2											
	1 familia y algunas aleatorias	3											
	2 familias de diaclasas	4											
	2 familias y algunas diaclasas aleatorias	6											
	3 familias de diaclasas	9											
	3 familias y algunas diaclasas aleatorias	12											
	4 o más familias	15											
	Roca triturada	20											
3.Índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Diaclasas discontinuas	4											
	Onduladas,rugosas o irregulares	3											
	Onduladas, lisas	2											
	Onduladas, perfectamente lisas	1,5											
	Planas, rugosas o irregulares	1,5											
	Planas, lisas	1											
	Planas, perfectamente lisas	0,5											
4. Índice de alteración de las discontinuidades (Ja)	Discontinuidad cerrada	0,75											
	Planos de discontinuidad inalterados	1											
	Planos de discontinuidad ligeramente inalterados.Minerales no reblandecibles.	2											
	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3											
	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción.	4											
	Partículas arenosas, libre de arcilla	4											
	Fuertemente sobreconsolidados, minerales arcillosos no blandos	6											
	Sobreconsolidación media a baja, minerales arcillosos.	8											
	Rellenos de arcillas expansivas	8-12											

5. Factor de orientación de Discontinuidad	Muy favorable	2												
	Bastante favorable	1												
	No favorable	0,75												
	no muy favorable	0,5												
	Provocando un fallo si no está con soporte	0,25												
6.Ambiente y condiciones geológicas Jwice	**Desierto Húmedo Tropical Hielo**		$\frac{Jr}{Ja}$ X Factor de Orientación											
Estable, competente roca	1 0,7 0,5 0,9		0,7	0,7	0,7			0,7	0,7		1	1	0,7
Estable, incompetente roca	0,7 0,6 0,3 0,5												
Inestable, competente roca	0,8 0,5 0,1 0,3					0,5	0,5			0,8			
Inestable, incompetente roca	0,5 0,3 0,05 0,2												
7. SRFa: Condición fisica	Ligero aflojamiento debido a la localización de la superficie	2,5											
	Bloques sueltos, señasles de tensión de grietas y discontinuidades de cillaza	5											
	Similar a la anterior, pero fuerte suceptibilidad a efectos de alteración	10											
	Talud esta en una avanzada estado de erosión y perdida por erosión del agua.	15											
	Talud residual, material transportado y deslizado	20											
		Total	25	1,0	0,3	6,1	1,3	3,6	9,2	1,0	1,2	0,1	1,2

Estos resultados indican la calidad del macizo rocoso a través del puntaje obtenido de los parámetros del Q-slope.

Tabla 36. Clasificación a través del índice Q-slope

INDICE Q Slope			N° de Afloramiento										
PARÁMETROS	Características	Puntaje	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22
1. Calidad del testigo RQD(%)	Muy mala	0-25											
	Mala	25-50										33,1	
	Media	50-75	62,7	73,6	73,6			55,8			59,2		69,9
	Buena	75-90				80,9	77,2		87,8	87,8			
	Excelente	90-100											
2.Índice de diaclasado (Jn)	Roca masiva	0,5-1,0											
	1 familia de diaclasas	2											
	1 familia y algunas aleatorias	3											
	2 familias de diaclasas	4											
	2 familias y algunas diaclasas aleatorias	6											
	3 familias de diaclasas	9											
	3 familias y algunas diaclasas aleatorias	12											
	4 o más familias	15											
	Roca triturada	20											
3.Índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Diaclasas discontinuas	4											
	Onduladas,rugosas o irregulares	3											
	Onduladas, lisas	2											
	Onduladas, perfectamente lisas	1,5											
	Planas, rugosas o irregulares	1,5											
	Planas, lisas	1											
	Planas, perfectamente lisas	0,5											
4. Índice de alteración de las discontinuidades (Ja)	Discontinuidad cerrada	0,75											
	Planos de discontinuidad inalterados	1											
	Planos de discontinuidad ligeramente inalterados.Minerales no reblandecibles.	2											
	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3											
	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción.	4											
	Partículas arenosas, libre de arcilla	4											
	Fuertemente sobreconsolidados, minerales arcillosos no blandos	6											
	Sobreconsolidación media a baja, minerales arcillosos.	8											
	Rellenos de arcillas expansivas	8-12											

5. Factor de orientación de Discontinuidad	Muy favorable	2											
	Bastante favorable	1											
	No favorable	0,75											
	no muy favorable	0,5											
	Provocando un fallo si no está con soporte	0,25											
6.Ambiente y condiciones geológicas Jwice	**Desierto Húmedo Tropical Hielo**		$\frac{Jr}{Ja}$ X Factor de Orientación										
Estable, competente roca	1 0,7 0,5 0,9			0,7	0,7	0,7	0,7	0,7		0,7			
Estable, incompetente roca	0,7 0,6 0,3 0,5												
Inestable, competente roca	0,8 0,5 0,1 0,3								0,5		0,8	0,8	0,8
Inestable, incompetente roca	0,5 0,3 0,05 0,2		0,5										
7. SRFa: Condición fisica	Ligero aflojamiento debido a la localización de la superficie	2,5											
	Bloques sueltos, señasles de tensión de grietas y discontinuidades de cillaza	5											
	Similar a la anterior, pero fuerte suceptibilidad a efectos de alteración	10											
	Talud esta en una avanzada estado de erosión y perdida por erosión del agua.	15											
	Talud residual, material transportado y deslizado	20											
		Total	0,03	1,1	1,7	3,8	1,8	0,9	4,4	1,8	0,3	0,1	0,47

Estos resultados indican la calidad del macizo rocoso a través del puntaje obtenido de los parámetros del Q-slope.

Tabla 37. Clasificación a través del índice Q-slope

INDICE Q Slope			N° de Afloramiento										
PARÁMETROS	Características	Puntaje	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32	P33
1. Calidad del testigo RQD(%)	Muy mala	0-25											
	Mala	25-50			49,3	28,7			33,1				
	Media	50-75	73,6	59,2			52,5				55,8		49,3
	Buena	75-90						87,8		80,9		77,2	
	Excelente	90-100											
2.Índice de diaclasado (Jn)	Roca masiva	0,5-1,0											
	1 familia de diaclasas	2											
	1 familia y algunas aleatorias	3											
	2 familias de diaclasas	4											
	2 familias y algunas diaclasas aleatorias	6											
	3 familias de diaclasas	9											
	3 familias y algunas diaclasas aleatorias	12											
	4 o más familias	15											
	Roca triturada	20											
3.Índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Diaclasas discontinuas	4											
	Onduladas,rugosas o irregulares	3											
	Onduladas, lisas	2											
	Onduladas, perfectamente lisas	1,5											
	Planas, rugosas o irregulares	1,5											
	Planas, lisas	1											
	Planas, perfectamente lisas	0,5											
4. Índice de alteración de las discontinuidades (Ja)	Discontinuidad cerrada	0,75											
	Planos de discontinuidad inalterados	1											
	Planos de discontinuidad ligeramente inalterados.Minerales no reblandecibles.	2											
	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3											
	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción.	4											
	Partículas arenosas, libre de arcilla	4											
	Fuertemente sobreconsolidados, minerales arcillosos no blandos	6											
	Sobreconsolidación media a baja, minerales arcillosos.	8											
	Rellenos de arcillas expansivas	8-12											

5. Factor de orientación de Discontinuidad	Muy favorable	2											
	Bastante favorable	1											
	No favorable	0,75											
	no muy favorable	0,5											
	Provocando un fallo si no está con soporte	0,25											
6.Ambiente y condiciones geológicas Jwice	**Desierto Húmedo Tropical Hielo**		$\frac{Jr}{Ja}$ X Factor de Orientación										
Estable, competente roca	1 0,7 0,5 0,9						0,7	0,7		0,7			
Estable, incompetente roca	0,7 0,6 0,3 0,5								0,6			0,7	
Inestable, competente roca	0,8 0,5 0,1 0,3		0,8	0,8	0,8	0,8					0,8		0,8
Inestable, incompetente roca	0,5 0,3 0,05 0,2												
7. SRFa: Condición fisica	Ligero aflojamiento debido a la localización de la superficie	2,5											
	Bloques sueltos, señasles de tensión de grietas y discontinuidades de cillaza	5											
	Similar a la anterior, pero fuerte suceptibilidad a efectos de alteración	10											
	Talud esta en una avanzada estado de erosión y perdida por erosión del agua.	15											
	Talud residual, material transportado y deslizado	20											
		Total	2,94	1,40	0,58	0,77	0,61	1,0	0,17	1,26	2,23	0,5	0,3

Estos resultados indican la calidad del macizo rocoso a través del puntaje obtenido de los parámetros del Q-slope.

Tabla 38. Clasificación a través del índice Q-slope

INDICE Q Slope			N° de Afloramiento							
PARÁMETROS	Características	Puntaje	P34	P35	P36	P37	P38	P39	P40	P41
1. Calidad del testigo RQD(%)	Muy mala	0-25	13,6				19,9	9,16	17,1	9,16
	Mala	25-50		30,8						
	Media	50-75			69,9					
	Buena	75-90				80,9				
	Excelente	90-100								
2.Índice de diaclasado (Jn)	Roca masiva	0,5-1,0								
	1 familia de diaclasas	2								
	1 familia y algunas aleatorias	3								
	2 familias de diaclasas	4								
	2 familias y algunas diaclasas aleatorias	6								
	3 familias de diaclasas	9								
	3 familias y algunas diaclasas aleatorias	12								
	4 o más familias	15								
	Roca triturada	20								
3.Índice de rugosidad de las discontinuidades (Jr)	Diaclasas discontinuas	4								
	Onduladas,rugosas o irregulares	3								
	Onduladas, lisas	2								
	Onduladas, perfectamente lisas	1,5								
	Planas, rugosas o irregulares	1,5								
	Planas, lisas	1								
	Planas, perfectamente lisas	0,5								
4. Índice de alteración de las discontinuidades (Ja)	Discontinuidad cerrada	0,75								
	Planos de discontinuidad inalterados	1								
	Planos de discontinuidad ligeramente inalterados.Minerales no reblandecibles.	2								
	Recubrimientos de arcillas limosas o arenosas.	3								
	Recubrimientos de arcillas blandas o de baja fricción.	4								
	Partículas arenosas, libre de arcilla	4								
	Fuertemente sobreconsolidados, minerales arcillosos no blandos	6								
	Sobreconsolidación media a baja, minerales arcillosos.	8								
	Rellenos de arcillas expansivas	8-12								

5. Factor de orientación de Discontinuidad	Muy favorable	2								
	Bastante favorable	1								
	No favorable	0,75								
	no muy favorable	0,5								
	Provocando un fallo si no está con soporte	0,25								
6.Ambiente y condiciones geológicas Jwice	**Desierto Húmedo Tropical Hielo**		$\frac{Jr}{Ja}$ X Factor de Orientación							
Estable, competente roca	1 0,7 0,5 0,9				1					
Estable, incompetente roca	0,7 0,6 0,3 0,5									0,7
Inestable, competente roca	0,8 0,5 0,1 0,3		0,8	0,8		0,5	0,5	0,5	0,5	
Inestable, incompetente roca	0,5 0,3 0,05 0,2									
7. SRFa: Condición fisica	Ligero aflojamiento debido a la localización de la superficie	2,5								
	Bloques sueltos, señasles de tensión de grietas y discontinuidades de cillaza	5								
	Similar a la anterior, pero fuerte suceptibilidad a efectos de alteración	10								
	Talud esta en una avanzada estado de erosión y perdida por erosión del agua.	15								
	Talud residual, material transportado y deslizado	20								
		Total	0,1	0,2	1,2	0,2	0,1	0,03	0,06	0,05

Los resultados de la sección 3.7 presentes en las tablas, indican la calidad del macizo rocoso a través del puntaje obtenido del Q-slope.

Además se pudo calcular el ángulo de estabilidad por medio del valor Q-slope que permite que el talud se mantenga seguro sin ningún soporte o reforzamiento, se debe considerar que esta modificación geométrica del ángulo es válido para taludes con un tamaño máximo de 30 metros de altura. El ángulo de estabilidad se obtuvo por medio de la “Ecuación 8”.

En la siguiente “Tabla 39”, se exhibe la calidad del macizo rocoso y el ángulo de estabilidad que se obtuvo en la zona de estudio

Tabla 39. Resultados Q-slope.

Afloramiento	Puntaje del índice Q-slope	Clasificación	Ángulo de estabilidad (º)
P1	24,59	R. buena	90
P2	1,0121	R. muy mala	65,10
P3	0,2664	R. muy mala	53,51
P4	6,0659	R. media	80,66
P5	1,3123	R. mala	67,36
P6	3,5823	R. mala	76,08
P7	9,2200	R. media	84,29
P8	0,9939	R. muy mala	64,95
P9	1,1819	R. mala	66,45
P10	0,1285	R. muy mala	41,16
P11	1,1596	R. mala	66,29
P12	0,0326	R. extrema mala	35,28
P13	1,1445	R. mala	66,17
P14	1,7168	R. mala	69,69
P15	3,7744	R. mala	76,54
P16	1,8025	R. mala	70,12
P17	0,8677	R. muy mala	63,77
P18	4,3905	R. media	77,85
P19	1,8212	R. mala	70,21
P20	0,2959	R. muy mala	54,42
P21	0,1323	R. muy mala	47,43
P22	0,4660	R. muy mala	58,37
P23	2,9430	R. mala	74,38
P24	1,4029	R. mala	67,94
P25	0,5846	R. muy mala	60,34
P26	0,7661	R. muy mala	62,69
P27	0,6124	R. muy mala	60,74
P28	1,0244	R. muy mala	65,21
P29	0,1654	R. muy mala	49,37
P30	1,2581	R. mala	66,99
P31	2,2313	R. mala	71,97
P32	0,4506	R. muy mala	58,08
P33	0,3288	R. muy mala	55,34
P34	0,1449	R. muy mala	48,22
P35	0,2056	R. muy mala	51,26
P36	1,1650	R. mala	66,33
P37	0,2022	R. muy mala	51,12
P38	0,0747	R. extrema mala	42,46
P39	0,0286	R. extrema mala	34,13
P40	0,0571	R. extrema mala	40,13
P41	0,0534	R. extrema mala	39,55

Una vez determinado la calidad del macizo rocoso con el índice Q-slope, se propuso comparar los resultados obtenidos del índice RMR con el Q-slope a través la “Ecuación 9” y “Ecuación 10” y observar si los valores se correlacionan o muestran demasiada variación al indicar la calidad del macizo rocoso.

Tabla 40. Correlación del índice Q con el índice RMR.

N° Afloramiento	RMR	Q	Bienawaski Q(1976 y 1989)	Barton Q(1995)
P1	77	24,59	39,12	63,10
P2	52	1,01	2,43	1,36
P3	44	0,27	1,00	0,40
P4	56	6,07	3,79	2,51
P5	62	1,31	7,39	6,31
P6	77	3,58	39,12	63,10
P7	66	9,22	11,52	11,66
P8	43	0,99	0,89	0,34
P9	43	1,18	0,89	0,34
P10	50	0,06	1,95	1,00
P11	49	1,16	1,74	0,86
P12	45	0,03	1,12	0,46
P13	48	1,14	1,56	0,74
P14	50	1,72	1,95	1,00
P15	59	3,77	5,29	3,98
P16	57	1,80	4,24	2,93
P17	61	0,87	6,61	5,41
P18	55	4,39	3,39	2,15
P19	54	1,82	3,04	1,85
P20	58	0,30	4,74	3,41
P21	47	0,13	1,40	0,63
P22	57	0,47	4,24	2,93
P23	56	2,94	3,79	2,51
P24	51	1,40	2,18	1,17
P25	47	0,58	1,40	0,63
P26	36	0,77	0,41	0,12
P27	42	0,61	0,80	0,29
P28	55	1,02	3,39	2,15
P29	37	0,17	0,46	0,14
P30	42	1,26	0,80	0,29
P31	52	2,23	2,43	1,36
P32	54	0,45	3,04	1,85
P33	47	0,33	1,40	0,63
P34	35	0,14	0,37	0,10
P35	46	0,21	1,25	0,54
P36	57	1,17	4,24	2,93
P37	64	0,20	9,23	8,58
P38	33	0,07	0,29	0,07
P39	34	0,03	0,33	0,09
P40	33	0,06	0,29	0,07
P41	37	0,05	0,46	0,14

Los valores de la “Tabla 40” son el resultado de la correlación del índice RMR con el índice Q-slope a través de las ecuaciones 9 y 10.

Se puede observar que los valores obtenidos por los dos métodos (Bieniawski y Barton), algunos son similares, otros difieren un poco en su valor y otros son muy distintos. Esto significa que al caracterizar los macizos rocosos se debe reflexionar sobre el puntaje obtenido para cada parámetro geomecánico asignado y que el método del índice Q-slope considera un factor de ajuste de orientación de las discontinuidades y un parámetro extra que corresponde al SRF, el cual no se considera en el índice RMR.

El índice RMR, ayuda a clasificar la calidad del macizo rocoso a través de su puntaje, también podremos saber el tipo de estabilidad (SMR) que posee el talud, y que posibles obras realizar para poderlo estabilizar.

Mientras que el Q-slope, también señala la calidad del macizo rocoso a través del puntaje obtenido, se diferencia del RMR, porque considera otros parámetros como las condiciones ambientales y condiciones físicas de la superficie de la pendiente. Facilita la estabilidad a través del ángulo de máxima pendiente (β) de estabilidad, solucionando de una manera sencilla y a bajo costo la permanencia del talud, pero durante cuánto tiempo se desconoce ese dato por parte de este método.

El índice RMR es un valor básico, donde podemos tener una percepción de cómo se comportaría ese macizo rocoso con esas condiciones. Pero al acoplarse con el índice SMR, su resultado se vuelve más confiable para aplicar las medidas de estabilidad ya sea por medio de obras de contingencia o rediseño de la geometría del talud.

3.8 Resultados obtenidos del ajuste de corrección al RQD

Después obtener todos los resultados anteriores de calidad y estabilidad por parte del RMR y SMR, se procedió a realizar un ajuste al RQD, a través de los minerales de alteración utilizando la “Ecuación 11”.

Cabe recordar que los valores de ajuste es el porcentaje de promedio de minerales alteración + el promedio de microfisuras designadas para cada estado que presenta el (Ip’), ver “Tabla 19”.

A continuación se expone la “Tabla 41”, con el índice de alteración (Ip’) obtenido para cada afloramiento. Debemos recordar que el porcentaje de cada mineral se obtuvo mediante un análisis de láminas delgadas y ensayos de Difracción de rayos X.

Tabla 41. Ajuste de corrección mediante índice de alteración (Ip')

N° DE AFLORAMIENTO	% MINERAL RESISTENTE	% MINERAL ALTERADO	% MICROFISURAS	IP'
P1	91	8	15	4
P2	70	14	20	2,05
P3	74	20	15	2,11
P4	92	8	15	4
P5	93	6	17	4,04
P6	95	5	10	6,3
P7	92	8	7	6,13
P8	89	11	12	3,86
P9	75	25	6	2,41
P10	89	10	12	4,05
P11	92	8	15	4
P12	67	26	10	1,86
P13	93	7	16	4,04
P14	91	8	14	4,13
P15	91	9	12	4,3
P16	90	10	10	4,5
P17	92	8	10	5,1
P18	88	11	9	4,4
P19	89	10	12	4,04
P20	86	14	15	2,96
P21	84	12	20	2,6
P22	85	15	13	3,03
P23	89	11	10	4,23
P24	83	15	17	2,6
P25	80	15	15	2,66
P26	85	14	10	3,54
P27	88	12	7	4,63
P28	85	13	8	4,04
P29	82	18	10	2,92
P30	88	10	12	4
P31	90	8	14	4,09
P32	80	15	5	4
P33	80	17	10	2,96
P34	85	12	19	2,74
P35	88	10	12	4
P36	89	11	11	4,04
P37	92	10	7	5,41
P38	85	15	12	3,14
P39	74	20	18	1,9
P40	52	40	14	0,96
P41	69	31	22	1,3

Una vez obtenido el índice de alteración se realizó el ajuste al RQD, ver “Tabla 42”.

Tabla 42. Valor sin corregir (RQD.S.C) y valor corregido (RQD.C)

N° de Afloramiento	Ip'	Valor de ajuste	RQD S.C	RQD. C.
P1	2,5	-17	87,81	70,81
P2	1,4	-27	43,37	16,37
P3	1,75	-27	40,60	13,60
P4	3,1	-17	80,88	63,88
P5	2,3	-17	52,49	35,49
P6	4	-12	90,98	78,98
P7	4,1	-12	87,81	75,81
P8	1,3	-27	66,26	39,26
P9	1,3	-27	35,46	8,46
P10	2,3	-17	30,84	13,84
P11	3,21	-17	66,26	49,26
P12	0,69	-34	62,68	28,68
P13	2,83	-17	73,58	56,58
P14	3,56	-17	73,58	56,58
P15	3,27	-17	80,88	63,88
P16	3,5	-17	77,25	60,25
P17	2,8	-17	55,78	38,78
P18	2,62	-17	87,81	70,81
P19	2,34	-17	87,81	70,81
P20	2,04	-27	59,18	32,18
P21	1,61	-27	33,09	6,09
P22	1,05	-27	69,90	42,90
P23	2,83	-17	73,58	56,58
P24	1,34	-27	59,18	32,18
P25	1,67	-27	49,32	22,32
P26	2,21	-27	28,73	1,73
P27	3,08	-17	52,49	35,49
P28	2,88	-17	87,81	70,81
P29	1,49	-27	33,09	6,09
P30	2,68	-17	80,88	63,88
P31	3,12	-17	55,78	38,78
P32	3,26	-17	77,25	60,25
P33	2	-27	49,32	22,32
P34	2,26	-27	13,59	0,00
P35	2,41	-17	30,84	13,84
P36	3	-17	69,90	52,90
P37	5	-12	80,88	68,88
P38	1,13	-27	19,91	0,00
P39	0,92	-34	9,16	0,00
P40	0,96	-34	17,12	0,00
P41	1,3	-27	9,16	0,00

Después de obtener los nuevos valores de RQD, se procedió a encontrar nuevamente el índice RMR y SMR, ver siguiente tabla.

Tabla 43. Valor corregido (C) y no corregido (SC)

N°	RMR S.C	RMR.C	CLASE (RMR.C)	SMR S.C	SMR.C	CLASE (SMR.C)
1	77	73	II	62,625	58,625	III
2	52	49	III	48,25	45,25	III
3	44	40	IV	59	55	III
4	56	52	III	70,1	66,1	II
5	62	55	III	69,35	62,35	II
6	77	74	II	27	24	IV
7	66	66	II	50,35	50,35	III
8	43	36	IV	34	27	IV
9	43	40	IV	49	46	III
10	50	47	III	36,75	33,75	IV
11	49	42	III	56,5	49,5	III
12	45	38	IV	39,9	32,9	IV
13	48	48	III	39	39	IV
14	50	48	III	45	43	III
15	59	55	III	70,25	66,25	II
16	57	53	III	65	61	II
17	61	54	III	59	52	III
18	55	51	III	54,1	50,1	III
19	54	50	III	65,25	61,25	II
20	58	51	III	45,6	38,6	IV
21	47	44	III	13	10	V
22	57	50	III	39	32	IV
23	56	56	III	60,25	60,25	III
24	51	44	III	42,1	35,1	IV
25	47	44	III	19	16	V
26	36	33	IV	43,5	40,5	IV
27	42	35	IV	26	19	V
28	55	51	III	37,4	33,4	IV
29	37	34	IV	25,25	22,25	IV
30	42	38	IV	47,4	43,4	III
31	52	45	III	35	28	IV
32	54	50	III	65,25	61,25	II
33	47	44	III	35	32	IV
34	35	35	IV	33	33	IV
35	46	43	III	11,5	8,5	V
36	57	57	III	62,6	62,6	II
37	64	60	III	21	17	V
38	33	33	IV	23,5	23,5	IV
39	34	34	IV	24	24	IV
40	33	33	IV	25,5	25,5	IV
41	37	37	IV	33,4	33,4	IV

En la “Tabla 43” se puede observar los nuevos valores para el índice RMR, y el índice SMR. Los valores para el índice RMR, varían según la puntuación asignada para el RQD, que varía desde 20 puntos a 3 puntos, observar “Tabla 21”.

Se puede identificar que el puntaje de algunos afloramientos no varía, esto depende de dos factores, el primero es, si el nuevo puntaje se encuentra dentro del rango puntuado para el RQD, por ejemplo si tenemos un puntaje de 85% y el corregido es de 75%, estos valores están dentro del rango de 90 a 75%, por lo cual tendrán la misma puntuación. El segundo caso es cuando se obtiene la menor puntuación, todos los valores <25% tendrán el valor de 3 y por lo tanto valor del índice RMR se mantendrá constante.

Después de conseguir los nuevos valores para el índice RMR y SMR, se procedió a realizar la interpretación del RQD, y SMR a través de la construcción de mapas

3.9 Mapas de distribución del RQD y Geotécnico

A continuación se expone el mapa de distribución del índice Q, con los valores no corregidos y corregidos. Una vez construido los mapas en el programa ArcGis, se podrá comparar y analizar la diferente distribución espacial de la calidad de los macizos rocosos a través de este parámetro geomecánico.

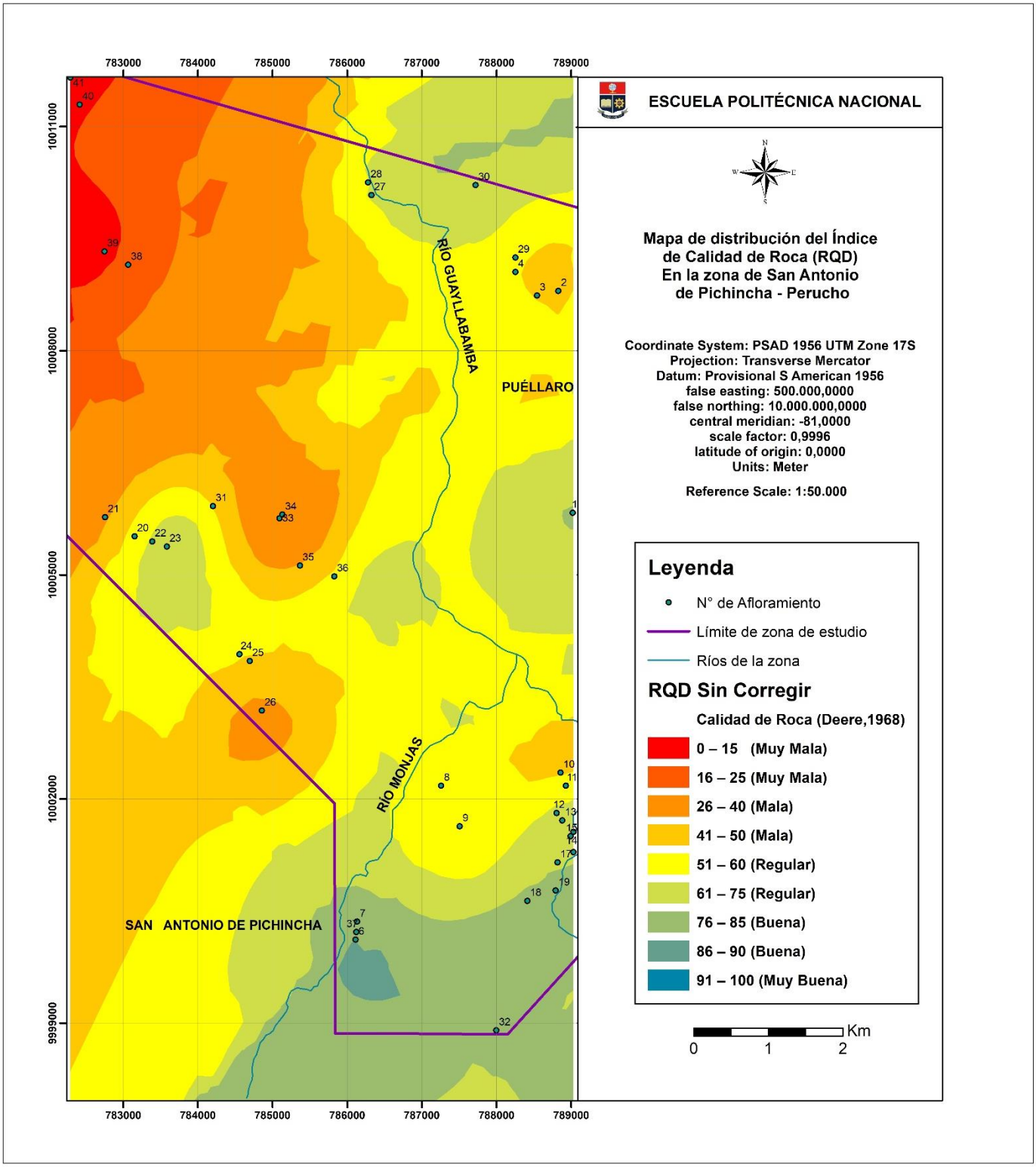

Figura 59. Mapa de índice RQD no corregido.

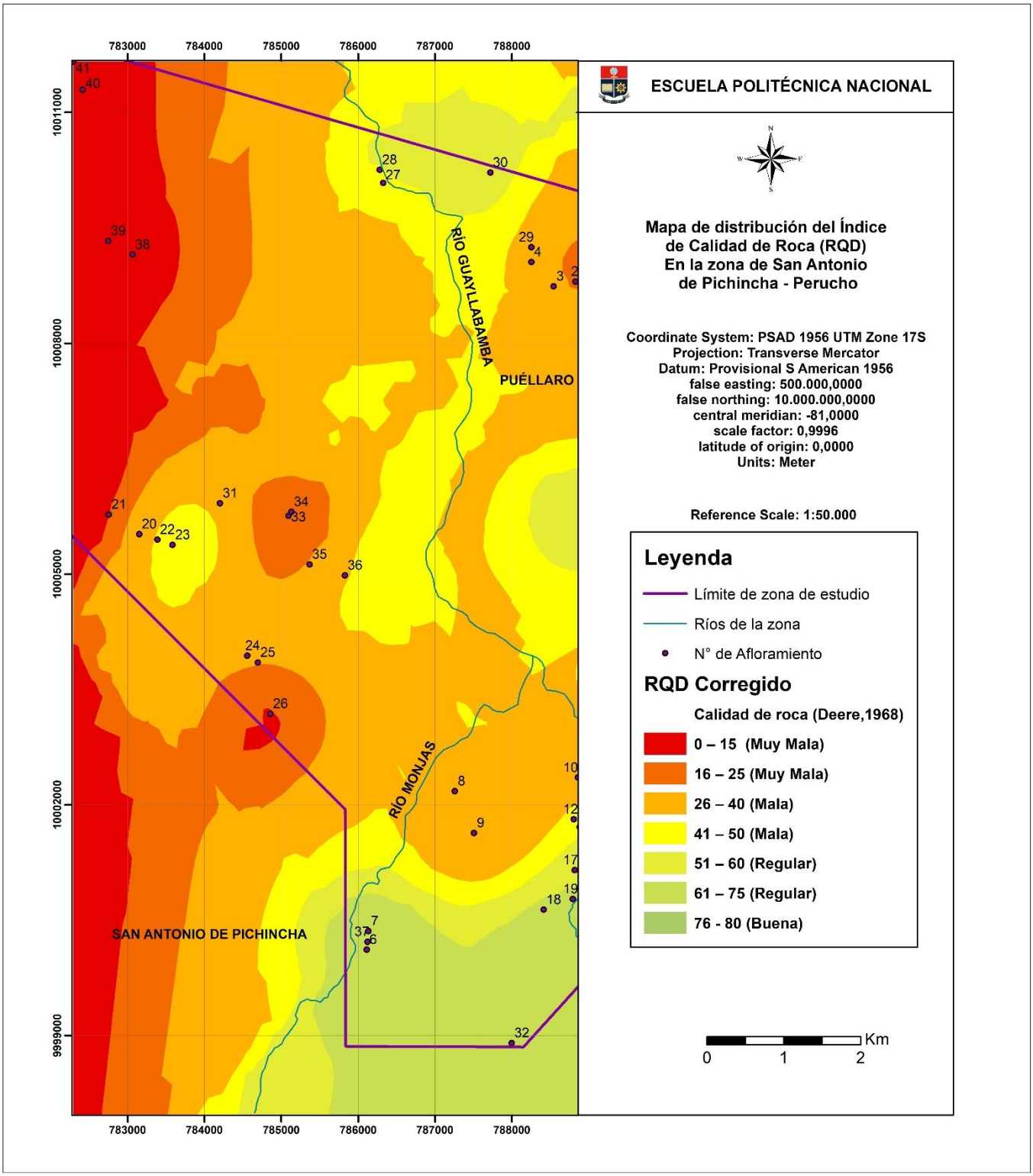

Figura 60. Mapa de índice RQD corregido.

En la “Figura 59”, podemos observar la calidad de los macizos rocosos de la zona a través del parámetro RQD, el cual considera el número de fracturas sobre un espacio específico. El mapa fue construido con medidas geoestadísticas, el “Método 2.8” del capítulo 2 explica la construcción de este mapa.

Analizando el mapa se puede observar que la calidad de la roca disminuye (Muy mala) hacia el NW, lugar donde se ubica los afloramientos (38,39,40,41) con mayor alteración. Los afloramientos 38 y 39 de composición dacítica presentan plagioclasas alterándose en arcilla, mientras que en el afloramiento 40 (conglomerado volcánico) existe una solución que destruye todos los componentes de la roca y vuelve inestable al talud, y en el afloramiento 41, hay presencia de lutitas poco deformadas, con alta presencia de minerales arcillosos y reemplazamientos a través de soluciones silíceas.

Mapa Geotécnico

Después de evaluar todos los parámetros geomecánicos de los macizos rocosos, se pudo desarrollar un mapa geotécnico en base a los valores obtenidos en la “Tabla 43” (SMR.C y SMR.SC), el cual señala el valor de estabilidad de cada talud.

La construcción de estos mapas se realizó mediante la combinación del programa SGeMS y el programa Arc-Gis, este método se explica en la parte 2.7 y 2.8 del capítulo 2.

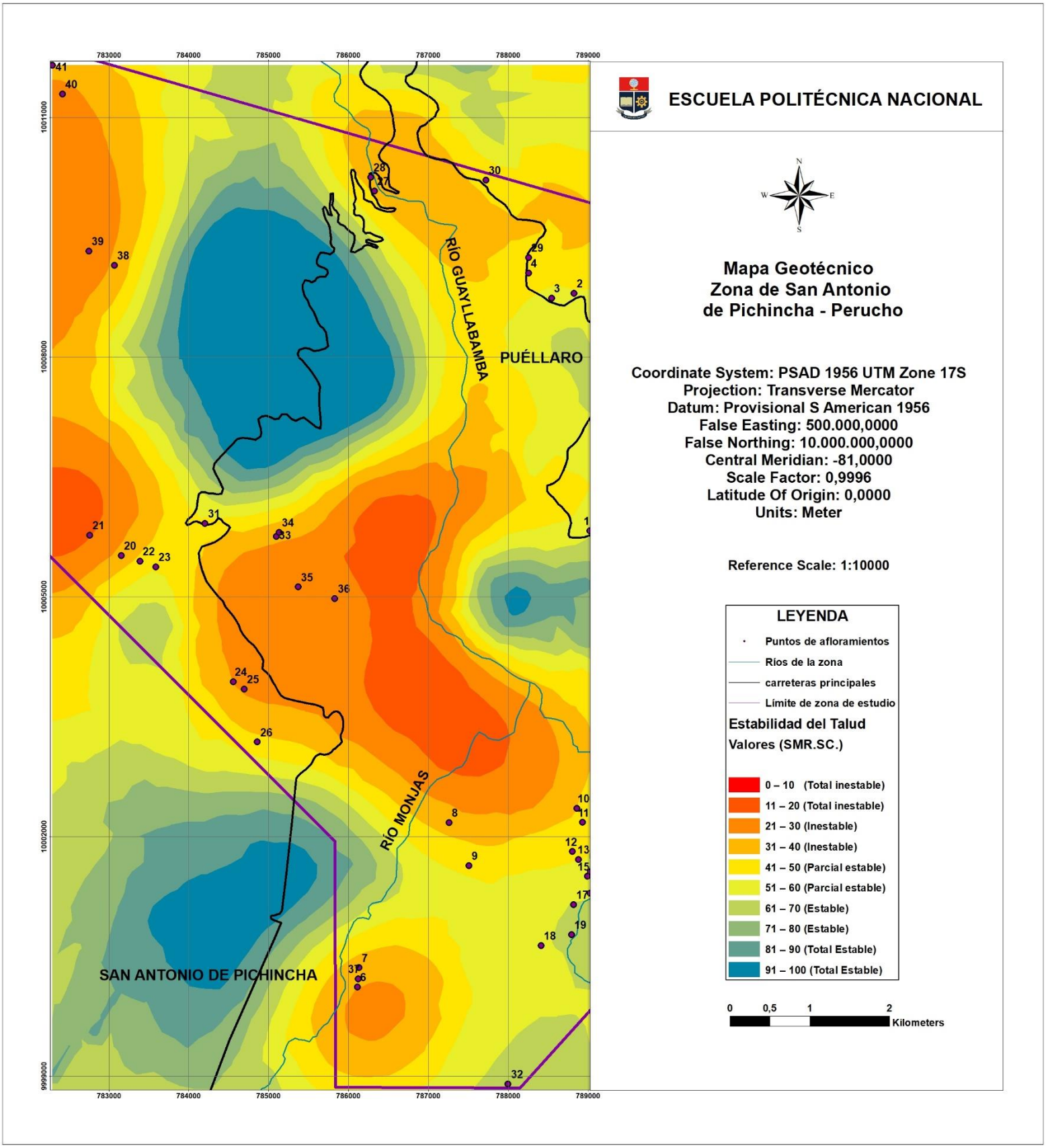

Figura 61. Mapa Geotécnico no corregido

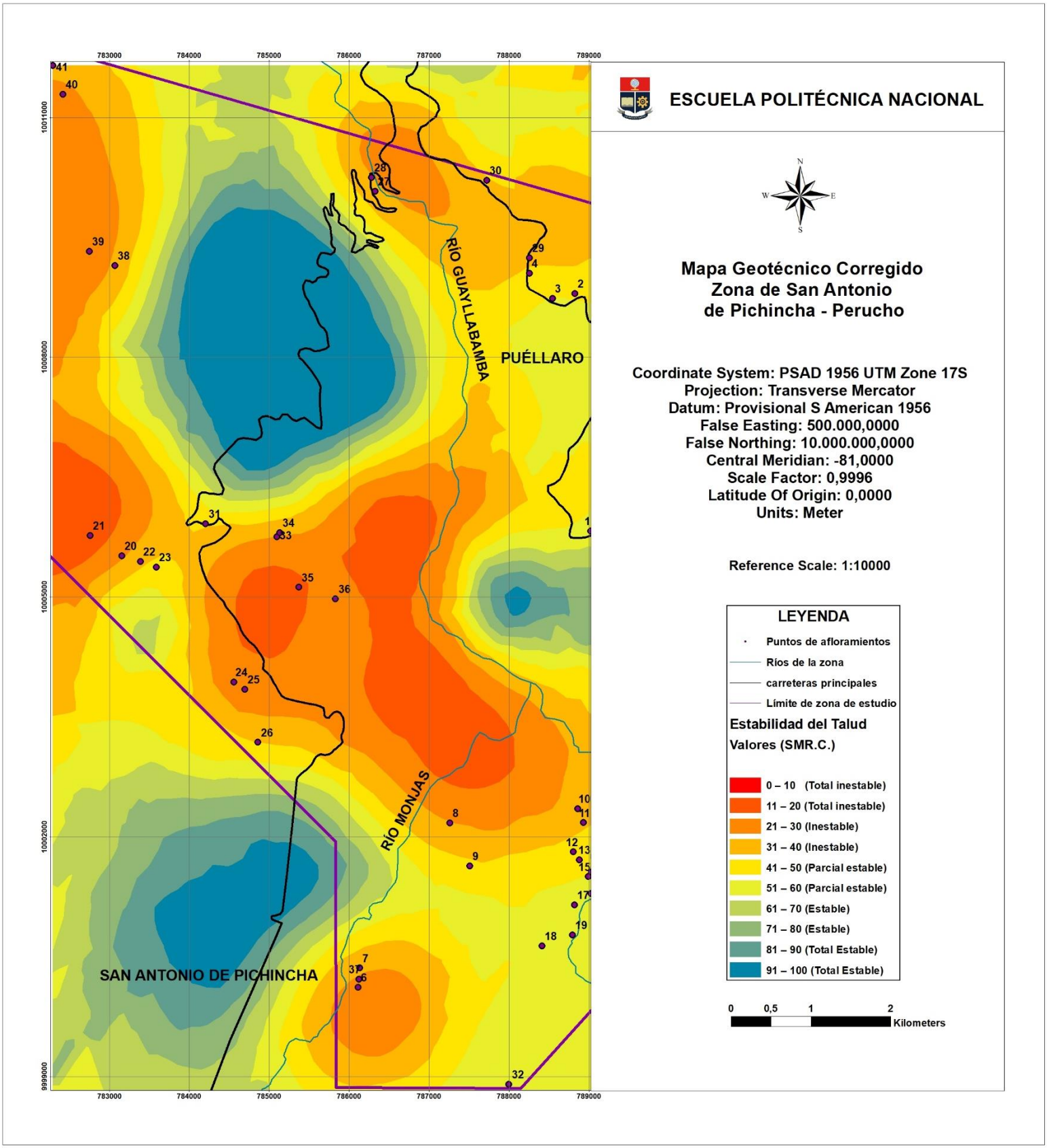

Figura 62. Mapa Geotécnico Corregido

3.10 Mapa de Pendientes

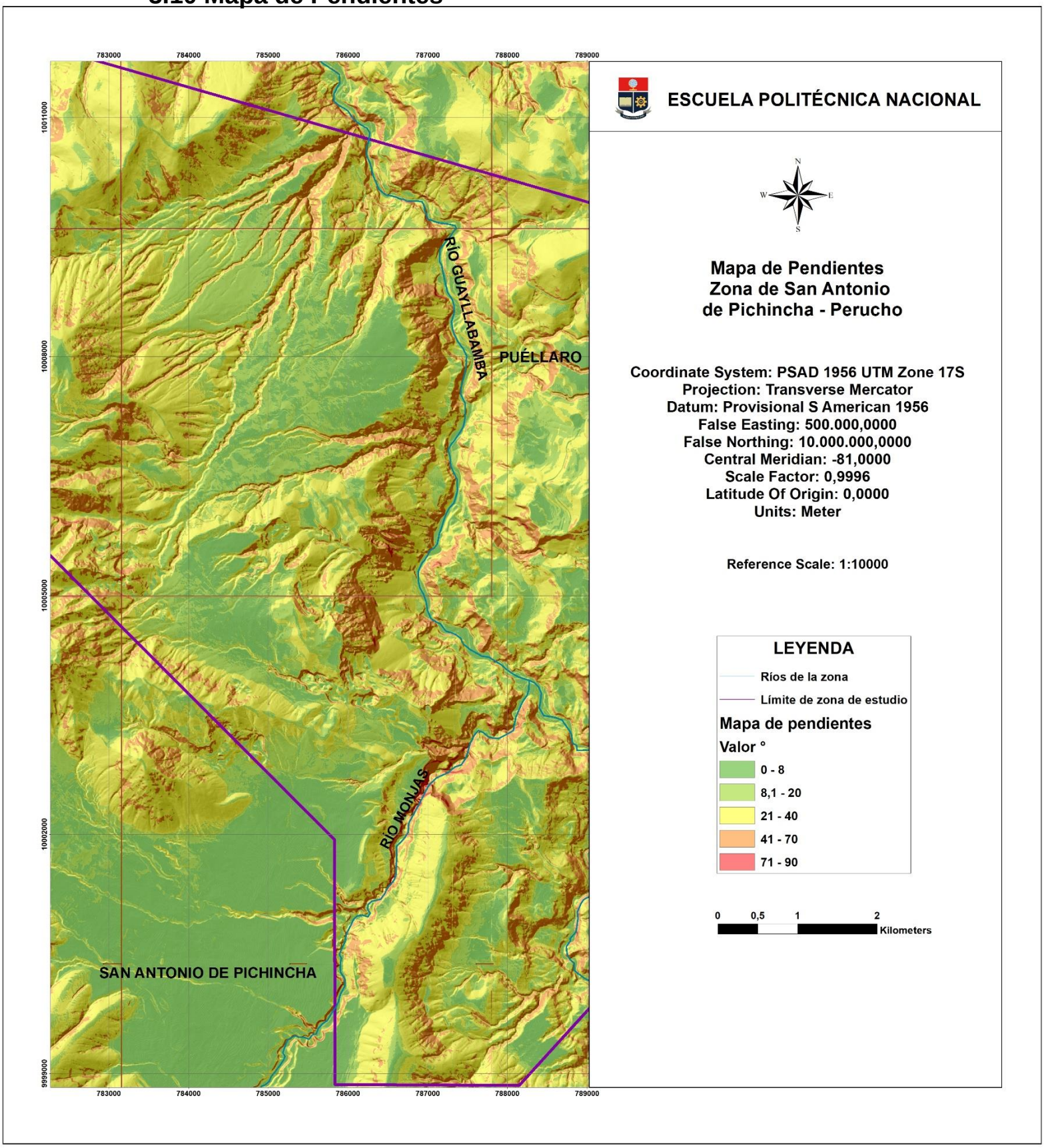

Figura 63. Mapa de pendientes de la zona de estudio

3.11 Mapa de Susceptibilidad de FRM de la zona de estudio

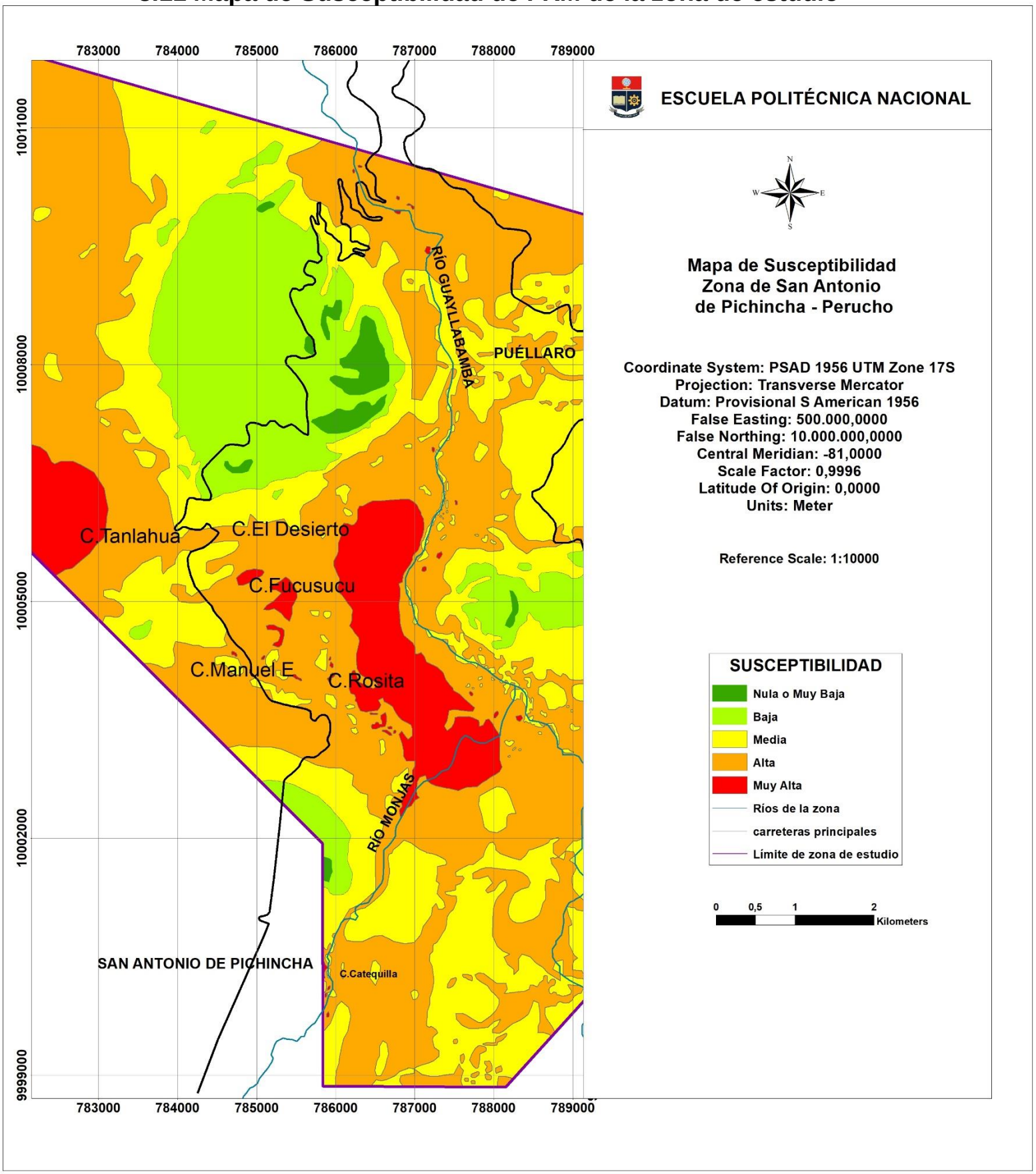

Figura 64. Mapa de Susceptibilidad a FRM

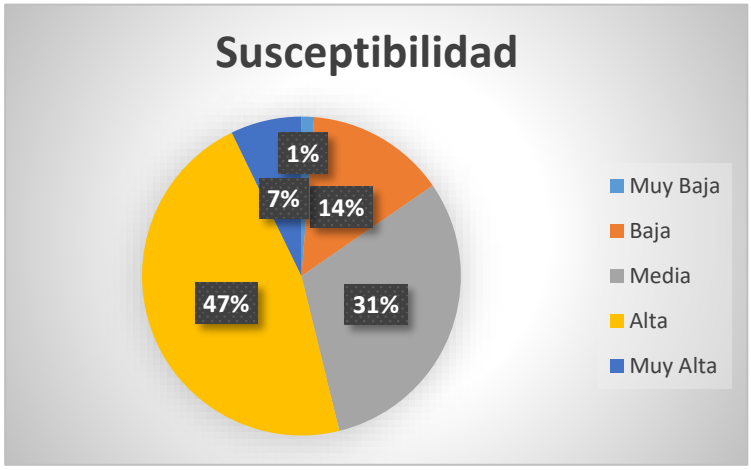

Figura 65. Análisis del mapa de susceptibilidad

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

4.1 Factores que intervienen en la inestabilidad de un talud

Después de haber obtenido los resultados en el capítulo 3, podemos señalar los siguientes posibles factores que generan inestabilidad en los taludes de la zona de San Antonio de Pichincha – Perucho.

El mapa de índice RQD, muestra la calidad de la roca a través del número de fisuras en un espacio designado, el resultado indicó que la peor calidad entre los macizos rocosos se encuentra al NW de la zona de estudio.

El análisis de láminas delgadas y ensayos de difracción de rayos X, muestran un 17,24% de minerales alterados y un 13,28% de microfisuras en promedio de los macizos rocosos de la zona de estudio ver “Figura 59 y 60”, este valor proporciona un gran interés para las zonas inestables, ya que influye directamente en la disminución de la resistencia al corte.

4.1.1 Factores Inherentes

Factor Geológico

Las Formaciones donde se encontró mayor inestabilidad fueron: Fm. Pululahua en el sector de las Canteras (Tanlagua, El Desierto, Fucusucu, Manuel Espinoza), Unidad Natividad (Afloramiento 40,41), Fm Mojanda-Fuya Fuya (Afloramiento 30, 29) y Fm Pisque (Afloramiento 5,6,37).

La Formación Pululahua es bastante joven, su composición y geomorfología no afectan a la estabilidad de los taludes, pero gran cantidad de fracturamientos son existentes en las canteras, volviendo inestable algunas zonas de la Formación.

La Unidad Natividad, contiene afloramiento bastantes alterados, existen soluciones que destruyen y reemplazan a la roca. En el afloramiento 41 existe lutitas violáceas y muchas de estas han sido reemplazadas con soluciones con alta cantidad de sílice. Mientras que en el afloramiento 40 existe una brecha volcánica que contiene una solución que destruye a toda la roca.

Los demás afloramientos contienen varias familias de discontinuidad que permiten la inestabilidad de la zona, acompañado con un buen porcentaje de minerales alterados y microfracturados o microfisurados.

Factor Geomorfológico y Pendiente

Podemos observar en la “Figura 63” las características geomorfológicas y el grado de pendiente existente en la zona. Las pendientes varían desde 8 a 90, la menor inclinación hace referencia a las distintas terrazas existentes en la zona y la mayor inclinación se aproxima a los edificios volcánicos y domos formados en el mismo lugar.

También se puede observar que existe una gran incisión de los ríos Guayllabamba y Monjas lo cual genera taludes verticales este se puede observar frente a la central Hidroeléctrica San Antonio de Pichincha (X: 0788793 Y: 10000775), que son debilitados poco a poco a través de la erosión en el pie del talud y las discontinuidades desfavorables en un macizo rocoso también desestabilizara al talud.

Factor de cobertura y Uso del suelo

La vegetación esteparia en la zona de Catequilla y las canteras de San Antonio de Pichincha no afectan directamente a la estabilidad de los taludes, al existir poca vegetación los macizos rocosos no sufren algún tipo de meteorización mecánica por parte de las raíces. Pero la vegetación en el resto de la zona afecta considerablemente a la estabilidad del talud, y aumenta su cobertura hacia el Noroccidente, donde el clima aumenta su temperatura.

Figura 66. Vegetación hacia el Norte de la zona

Figura 67. Vegetación al Noroccidente de la zona de estudio

El uso del suelo, depende de la ubicación geográfica y la composición litológica.

Al Occidente de la zona podemos encontrar varias canteras que se dedican a la explotación de materiales no metálicos, los cuales están destinados para obras civiles.

Figura 68. Cantera El Desierto

Las diferentes terrazas que se muestran en el área, se ha utilizado para el desarrollo agrícola.

Figura 69. Cultivos de maíz en las terrazas de Guayllabamba

Las terrazas al aproximarse al río Guayllabamba se encuentran inestables ya que existe evidencia de antiguos deslizamientos rotacionales al borde, por lo cual se debe tomar en cuenta para la toma de decisiones para futuro uso del suelo.

4.1.2 Factores que disminuyen la resistencia al corte

Se identificaron los siguientes factores que disminuyen la estabilidad de los taludes.

Meteorización

Existe tanto la meteorización mecánica y meteorización química. En ciertos lugares de la zona la vegetación es abundante y sus raíces se ubican dentro de las diferentes discontinuidades, aumentando la abertura de las diaclasas, destruyendo el macizo por dentro y generando la inestabilidad del talud.

Mientras que la meteorización química es más notable en las formaciones más antiguas. Los macizos rocosos al ser expuestos al ambiente, sufren oxidaciones en los minerales más vulnerables, como piroxenos, hornblenda, plagioclasa. La mayoría de los afloramientos contienen plagioclasa, este mineral facilita el desarrollo de arcillas al estar expuesto en el medio atmosférico.

La existencia de soluciones también facilita la meteorización química en algunos macizos rocosos.

La existencia de minerales alterados disminuye la resistencia al corte, ya que disminuye la fricción entre bloques facilitando el movimiento entre ellos.

Presión del Agua

En la zona no se pudo evidenciar de manera directa la presencia de agua, pero indirectamente en el interior puede existir la presencia de agua porque se evidencia el crecimiento de raíces dentro de las discontinuidades por lo cual se recomienda en futuros trabajos revisar si existe alguna escorrentía importante dentro de los macizos.

4.1.3 Factor que aumenta el esfuerzo cortante

El factor que aumenta el esfuerzo de corte es la configuración geométrica del talud.

Configuración Geométrica

Este factor es muy importante cuando se modifica un talud, siempre se debe considerar las diferentes tensiones que actúan en la zona, y el diseño que se va a realizar en el talud ya sea para extraer el material del macizo rocoso o dar abertura a nuevas vías.

En la zona de estudio, la única cantera que se encontró con un buen diseño de explotación es la Cantera de Tanlahua. Los diferentes bancos y bermas del lugar permitían la estabilidad de los taludes, y si existía algún tipo de movimiento de bloques podía ser controlado por las diferentes vías de seguridad.

También se debe examinar el método de excavación que se utiliza para realizar dicho corte en el talud. 9 afloramientos presentan una voladura deficiente aumentando el esfuerzo de corte, 13 afloramientos presentan una voladura suave, 12 afloramientos presentan taludes naturales y 7 afloramientos fueron configurados mecánicamente.

4.1.3 Discusión

Para poder caracterizar un macizo rocoso se debe efectuar un análisis detallado para cada parámetro geomecánico. El primer parámetro a considerar es el índice RQD que originalmente fue diseñado para su evaluación en testigos cilíndricos de muestras de roca obtenidos durante la perforación mecánica de los macizos rocosos, muchos autores (Deere 1963, Barton 1974, Priest y Hudson 1976, Kulhawy 1978, Godman 1980) han propuesto diferentes formas de obtener este parámetro directamente en el afloramiento rocoso en campo, el cual relaciona el número de discontinuidades con un

espacio específico existente en el macizo rocoso, pero el índice de calidad de roca no contempla todas las condiciones existentes en la exposición de un talud o en un sondeo realizado. Por lo cual se ha realizado un ajuste al índice RQD obtenido en afloramientos a través el índice de minerales alterados, el cual se describe en el capítulo 2, “Método 2.6” .

Zenóbio y Zuquette, 2004, a través de un estudio realizado en las minas de Minas Gerais en Brasil, proponen una corrección al parámetro RQD para taludes naturales, en este caso ellos consideran cuatro factores (La resistencia, la alteración, la mineralogía y niveles mineralógicos) con un respectivo puntaje que luego por medio de una división al RQD se obtendría el nuevo valor. En este estudio se ha considerado el porcentaje de mineral alterado más las microfisuras encontradas en los minerales, dicho porcentaje ajustará al índice RQD, proporcionando un valor más cercano a la estabilidad de dicho macizo rocoso. Estos ajustes proporcionarán una nueva perspectiva al momento de caracterizar los macizos rocosos a nivel nacional y con diferentes criterios podrá considerarse a nivel internacional.

Algunos autores (Tomado de García, 1985) consideran que a través del porcentaje de recuperación de un sondeo se puede obtener todos los parámetros esenciales (textura, espaciado, abertura, relleno en las discontinuidades, litología, tipo, etc.) para estabilizar un talud y el diseño de un túnel.

Cabe recalcar que en este estudio no se realizó ningún testigo de recuperación, el cual otorgaría una mejor perspectiva y caracterización del interior del macizo rocoso en esta zona, pero examinando los diferentes puntos económicos dentro de un proyecto, se ha realizado la caracterización mediante el índice RMR, que Bieniawski propuso en 1979, y recurriendo a la fórmula que Priest y Hudson en 1976 para el índice RQD se pudo obtener el valor de calidad de los macizos rocos, ajustándolo mediante el índice de alteración (Ip’).

La estabilidad del índice Q-slope que propone Barton y Bar en 2015 por medio del ángulo de estabilidad, es el método más económico para mantener en equilibrio un talud durante un cierto tiempo, pero no permite evaluar la estabilidad del macizo. Por lo cual debe ser considerada según el propósito del proyecto.

La relación que existe entre el índice RMR y el índice Q-slope “Tabla 40”, propuesta por Bieniawski 1989 y Barton 1995 , muestran una baja correlación, por lo cual se considera que el índice Q-slope exhibe una caracterización mucho más compleja en la caracterización de un macizo rocoso, ya que examina dos parámetros geomecánicos extras (SRF y condiciones ambientales) que el índice RMR no considera, además el Q-slope realiza también un ajuste de corrección mediante la orientación de las discontinuidades.

Mientras que el índice RMR muestre una caracterización básica de los macizos rocosos no podrá alcanzar una buena correlación con el índice Q-slope, por lo cual se debería realizar una relación entre el índice SMR que incluye al RMR y el índice Q-slope para obtener una mejor comparación entre estos dos métodos.

Recordemos que el esclerómetro mide la resistencia de la roca, a través del número de rebotes proporcionados y estos datos son procesados mediante un abanico de resistencia “Figura 17”. Pero todos estos valores sirven para calibrar los valores de resistencia a la compresión obtenidos mediante otro tipo de ensayo (Triaxial, simple, carga puntual), por lo cual se debe manejar estos valores de la manera más adecuada.

El ensayo de carga puntual facilita el levantamiento de datos directamente en el campo, ya que utiliza herramientas de fácil manipulación y transporte, pero los datos obtenidos presentan una mínima desviación estándar que debe ser considerada. Mientras que el ensayo de compresión simple presenta datos más exactos cercanos a la realidad ya que utiliza maquinaria mucho más compleja que la anterior. Muchos autores (ver en Aitalesh, 2015) proponen una correlación entre el ensayo de carga puntual y la resistencia a la compresión simple, mostrando diferentes interpretaciones que comprende la litología, su dureza o resistencia (Is), por lo cual se debe examinar detalladamente la ecuación que se aplicará en el estudio.

El mapa geotécnico realizado para la zona de San Antonio de Pichincha- Perucho muestra diferentes zonas de estabilidad según el macizo rocoso, pero al considerar la existencia de terrazas y antiguos deslizamientos se caracterizó estas zonas con un puntaje que mostraría la estabilidad más adecuada y cercana a la realidad. Se realizaron dos mapas geotécnicos, el primero “Figura 61” sin el ajuste al índice RQD, donde se observa que la mayor inestabilidad se concentra en el centro de la zona y en el borde Noroccidente, el centro de la zona se ubican la mayoría de canteras que se encuentran

explotando material de construcción y al noroccidente se encuentran taludes con bastante meteorización mecánica y química.

El segundo mapa geotécnico “Figura 62”, muestra el ajuste al índice RQD y podemos visualizar a través de un análisis entre los diferentes niveles de estabilidad, que la zona totalmente estable disminuye 0,166447 km^2 en área, la zona estable disminuye 1,828007 Km^2 en área, la zona parcialmente estable disminuye 0,835140 Km^2 en área, la zona inestable aumenta 1,38 Km^2 en área y la zona totalmente inestable aumenta en 1,445689 Km^2 en área.

La zona total del estudio abarca un área de 65 Km^2 , en donde se determinó por medio de ortofotografías que 8,7 km^2 comprenden las terrazas de Guayllabamba las cuales proporcionan estabilidad en la zona, por lo que no se genera una mayor cobertura de nivel inestable en el sector central, aunque algunas terrazas se encuentren cerca de deslizamientos antiguos, en un futuro pueden presentar alguna inestabilidad por lo cual se recomienda realizar análisis en aquella zona y examinar a través de un modelamiento como cambia a través de la época.

4.2 Posibles obras de Mitigación contra los Fenómenos de Remoción en Masa (FRM)

En la zona de estudio se caracterizó los macizos rocosos a través de los parámetros geomecánicos y se analizaron las siguientes posibles obras de mitigación para proteger: vías principales, grandes obras y canteras a cielo abierto existente en San Antonio de Pichincha. Los FRM presentes con mayor frecuencia son: caída de roca, flujo de detritos, avalancha de escombros, posibles deslizamientos detonados por sísmica natural o artificial.

4.2.1 Configuración geométrica

La forma más económica de poder estabilizar un talud es realizando una configuración geométrica, el diseño para esta protección es proporcionado por medio de bermas, cunetones y bancos, se debe tener en cuenta que esta configuración tiene un límite de tiempo la cual depende de las condiciones ambientes de la zona, porque no existe algún tipo de obra que mantenga a los bloques en su sitio.

El índice Q-slope muestra un ángulo de estabilidad que permite al talud mantenerse en equilibrio configurando su ángulo de pendiente. Bermas y cunetas complementarán la permanencia del talud.

Este tipo de obra permite reducir la energía de impacto y velocidad que generan los bloques al desprenderse de una gran altura, y puede añadirse una barrera de protección que permite una mayor seguridad.

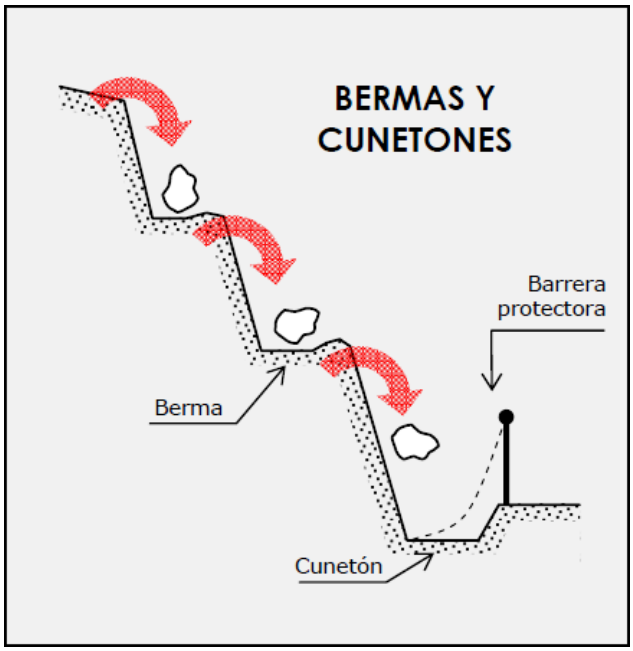

Figura 70. Estabilidad por medio de bermas y cunetones (Blázquez, 2000)

Este tipo de obras se aplica más en zonas de explotación ya que permite la seguridad necesaria al extraer el material.

4.2.2 Barreras Estáticas

Esta obra está definida como un muro o terraplén ubicado en el pie del talud la cual reduce la energía de impacto cuando chocan contra él. Está diseñado con hormigón armado permitiendo resistir los golpes generados por los bloques. Esta obra puede complementarse con la anterior asegurando la estabilidad del talud.

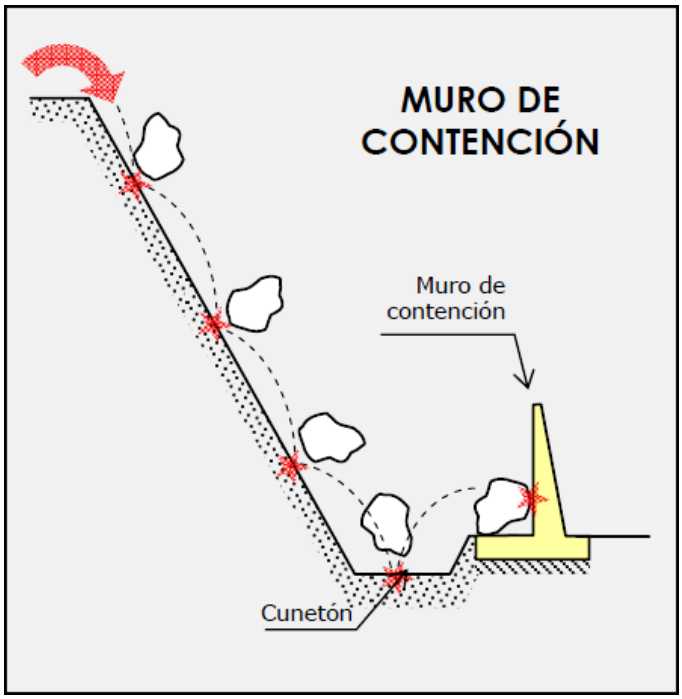

Figura 71. Estabilidad de taludes por medio de muros de contención (Blázquez, 2000)

Este tipo de obra sirve para contener caída de rocas y flujos de detritos, considerando la cantidad de material desprendido.

4.2.3 Malla de triple torsión

Este tipo de obra es más compleja que las anteriores, permite la retención del bloque desde su posición original. Está compuesta de mallas, anclajes y barreras de acero o gaviones. La malla cubre toda la pendiente, se sujeta desde la cabecera por medio de una correa de anclaje hasta el muro de acero o gaviones. Así mismo para ceñir la malla al terreno se ubica diferentes anclajes a una distancia conveniente que permite la estabilidad.

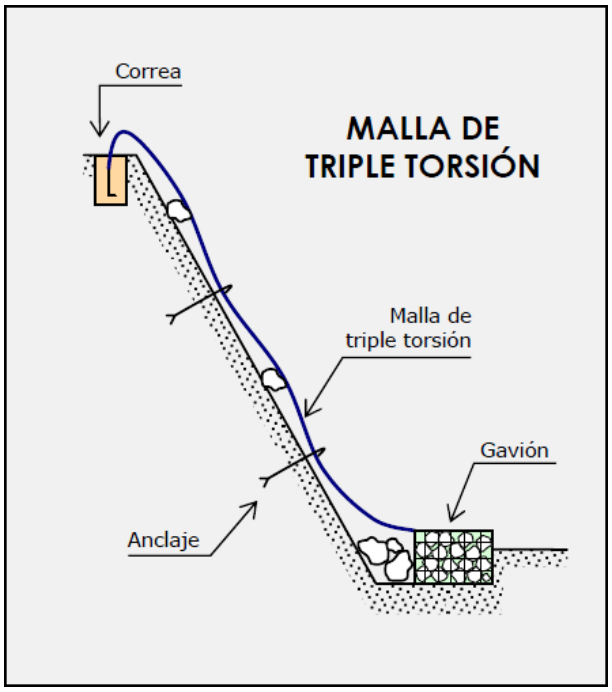

Figura 72. Estabilidad de taludes por medio de mallas de triple torsión (Blázquez, 2000)

4.2.4 Barrera Dinámica

Este tipo de obra es diseñada para aquellas superficies de taludes que no permiten el anclaje de mallas, por lo cual se propone esta barrera dinámica que permite la disipación de energía a través de postes metálicos que se encuentran unidos por varias mallas y cables que permiten la disminución de energía originada.

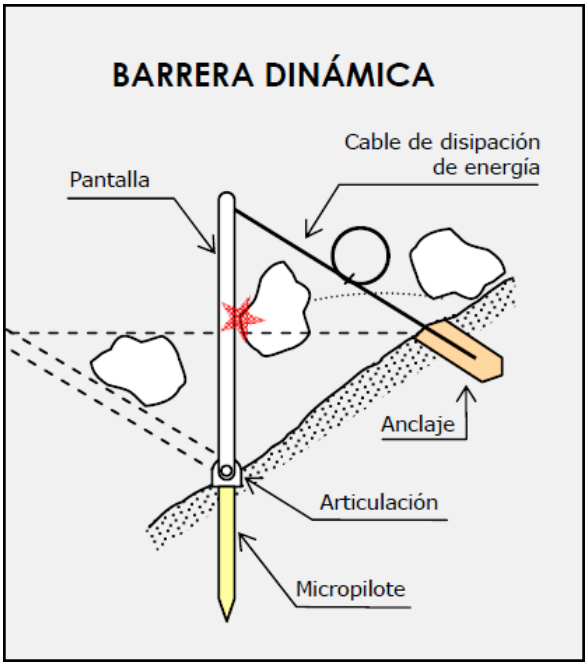

Figura 73. Barreras dinámicas (Blázquez, 2000)

Figura 74. Barrera dinámica (MACCAFERRI, 2017)

4.3 Conclusiones

Se ha realizado la evaluación de estabilidad de los macizos rocosos existentes en la zona de San Antonio de Pichincha – Perucho, a través de los parámetros geomecánicos, mineralogía, modelamientos geoestadísticos que permitirán la elaboración de planes de contingencia y obras de mitigación contra los fenómenos de remoción en masa.

Se realizó el estudio de las propiedades físico-mecánicas de 41 macizos rocosos existentes en la zona a través de los datos obtenidos en el campo y laboratorio, una vez procesada la información se pudo evaluar las posibles medidas de contingencia.

La mineralogía complementó el estudio a través de los minerales de alteración que permitieron el ajuste al índice RQD, logrando valores de estabilidad más aproximados a la realidad.

La caracterización de los macizos rocosos permitió la generación de algunos modelos geoestadísticos a través de los programas Arc Gis y SGeMS que permitieron identificar la calidad y estabilidad del talud en diferentes sectores importantes de la zona.

El ajuste que se realizó al índice RQD mediante los minerales de alteración otorgó valores más cercanos a la caracterización interna de un macizo rocoso, proporcionando una mejor apreciación al evaluar un talud de roca.

La información que se logró alcanzar durante el presente estudio fue la siguiente:

- El mapa de distribución del índice RQD ajustado presento la siguiente cobertura de área según la calidad del macizo rocoso, 15,11 Km^2 de macizos rocosos de muy mala calidad ubicado al Noroccidente de la zona de estudio, 42,039 Km^2 de macizos rocosos de mala calidad ubicado en el Centro de la zona, 8 Km^2 de

macizos rocosos de regular calidad ubicado al Este y Sur de la zona y solo 50 m^2 de macizos rocosos de calidad buena ubicado al Sur de la zona.

Descripción	Área RQD.SC (Km2)	Área RQD.C (Km2)	Diferencia de área (Km2)	Diferencia en porcentaje
Muy Mala Calidad	6,252491	15,11	8,85	0,13
Mala Calidad	32,204572	42,039	9,83	0,144
Regular Calidad	20,85	7,99	-12,86	-0,199
Buena Calidad	5,117	0,5	-4,617	-0,0711
Muy buena Calidad	0,54	0	-0,54	-0,0083

Descripción	Conclusiones
Muy Mala Calidad	Esta calidad de macizo rocoso aumenta en un 0,13% y aumenta 8,8 Km^2
Mala Calidad	Esta calidad de macizo rocoso aumenta en un 0,14% y aumenta 9,8 Km^2
Regular Calidad	Esta calidad de macizo rocoso disminuye en 0,19% y disminuye 12,86 km^2
Buena Calidad	Esta calidad de macizo rocoso disminuye en 0,07% y disminuye 4,6 Km^2
Muy buena Calidad	Esta calidad de macizo rocoso disminuye en 0,0083% y disminuye 0,54 Km^2

- El mapa Geotécnico ajustado presento la siguiente cobertura de área según la estabilidad del talud, 5,49 Km^2 taludes totalmente inestables ubicados al Noroccidente, Centro, Sur y Norte de la zona de estudio, 24,41 Km^2 taludes inestables ubicados en zonas aledañas de los taludes muy inestables, 20,30 Km^2 taludes parcialmente estables ubicados alrededor de los taludes muy inestable ver “Figura 62”, 6,4 Km^2 taludes estables ubicados al Norte y Este de la zona de estudio y 8,5 Km^2 totalmente estables ubicados en la misma dirección anterior. Al analizar el mapa Geotécnico básico con el mapa Geotécnico ajustado se pudo determinar que existe en promedio un ajuste de 2Km^2 para cada nivel de estabilidad.

- El mapa de susceptibilidad contra Fenómenos de Remoción en Masa presenta la siguiente proporción: 1,12% presenta el área una susceptibilidad muy baja a nula, 14,18% presenta el área una susceptibilidad baja, 30,8 % el área presenta una susceptibilidad media, 47% del área presenta una susceptibilidad alta y el 7% del área presenta una susceptibilidad muy alta.

Tabla 44. Valores de susceptibilidad

Susceptibilidad	Área (Km2)
Muy Baja	0,83
Baja	9,22
Media	20,08
Alta	30,42
Muy Alta	4,7

Los minerales de alteración que fueron identificados en la zona de estudio fueron los siguientes: al Sur en la zona cerca del río Guallyabamba donde se identificó basaltos porfiríticos de grano grueso se puedo encontrar a través de los ensayos de difracción de rayos X: al clinocloro, vermiculita, montmorillonita en un porcentaje de 6 a 4 %. Mientras que en la zona de las canteras se identificó: clinocloro y poco porcentaje de arcillas. En la zona Noroccidental se reconoció: clinocloro, caolinita, vermiculita, calcita.

La participación de las microfracturas que aparecen en los minerales principales también influye en la estabilidad del macizo rocoso, por lo cual se añadió el porcentaje de microfisuras al porcentaje de minerales alterados, obteniendo un adecuado índice de alteración.

La configuración geométrica adecuada de un talud proporciona estabilidad y seguridad en cualquier actividad que se realiza cerca o en dentro del macizo rocoso, considerando el tiempo en que se ejecutará el proyecto, para reforzarlo de acuerdo a la estabilidad.

El mapa Geotécnico ajustado y el mapa de susceptibilidad proporcionarán una adecuada información de partida para a futuro poder establecer medidas de contingencia y planes de mitigación para las amenazas que existen en el lugar de estudio.

La mayoría de Fenómenos de Remoción en Masa se enfocaban a caída de rocas que se originan a partir de las discontinuidades desfavorables a la estabilidad del talud y fue apreciable en la mayoría de canteras como: Fucusucu, Catequilla, Miguel Espinoza y El Desierto.

4.4 Recomendaciones

La mayoría de las canteras que se desarrollaron en el sector de San Antonio de Pichincha no poseen un adecuado mecanismo de explotación por lo cual generan una muy alta susceptibilidad en el momento de la extracción del material entonces se recomienda una explotación tecnificada a través de obras de estabilidad o

configuraciones geométricas del talud para salvaguardar vidas humanas y tratar de evitar pérdidas económicas considerables.

Es necesario identificar los minerales de alteración que afectan al macizo rocoso ya que muchos de estos tienen diferentes propiedades que cambian su comportamiento con diferentes factores, por ejemplo la aloisita, montmorillonita son arcillas expansivas por lo cual generaría más inestabilidad, mientras que la caolinita es una arcilla no expansiva pero afectaría con un grado de inestabilidad menor que las anteriores. De igual manera la resistencia de cada mineral de alteración varía y modifica los valores de resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa, por lo que se debe considerar la ocurrencia y caracterización de éstos minerales para poder estabilizar el talud a través de una obra de contingencia.

Para establecer la edad adecuada de los basaltos porfiríticos de grano grueso (Fm Pisque) encontrados frente a central Hidroeléctrica de San Antonio de Pichincha y el río Guallyabamba, se debería utilizar otro método de datación que no implique al Argón, ya que este elemento a una temperatura elevada o presión moderada escapa de las redes minerales ocasionando una datación errónea sobre su edad, por lo cual se recomendaría utilizar la datación U238/Pb206 que es el método de datación más preciso, ya que algunos autores atribuyen dos edades diferentes a esa formación, el Cretácico superior y Pleistoceno inferior.

Para poder mantener la seguridad y estabilidad de los taludes al momento de extraer el material de una cantera se sugiera realizar diferentes configuraciones geométricas y métodos de voladura que permitan una baja vulnerabilidad contra los fenómenos de remoción de masa. Si no existe la posibilidad de realizar este tipo de configuración se puede utilizar un muro de contención que permite reducir el impacto del bloque y mantenerlo en un cierto espacio. La malla de triple torsión permite la mayor estabilidad de los taludes generando mayor seguridad en obras civiles. Las barreras dinámicas son las estructuras más complejas que existen entre las obras de contingencia, utilizada en grandes obras civiles y canteras.

Es necesario contrastar con testigos de perforación los valores de RQD ajustado para de esta forma poder validar adecuadamente esta propuesta de método de corrección a este parámetro.

BIBLIOGRAFÍA

Almeida, Y. (2016). *Diseño de liquidación de la cantera Blanca II, ubicada en la parroquia San Antonio de Pichincha.* Proyecto integrador presentado para optar el Título de Ingeniería de Minas. Universidad Central del Ecuador, Quito.

Andrade, D. (2012). *Estudio geovolcanológico del Complejo Volcánico Pululahua*. Tesis de Ingeniería. Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 177-178.

ASTM C170/C170M, (2017). Standard test Method for Compressive Strength of Dimension Stone. *Development of International Standards.*

ASTM D5731, (2016). Standard test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and application to rock strength classifications. *Development of International Standards.*

ASTM D5873, (2005). Standard test Method for Determination of Rock Hardness by Rebound Hammer Method. *Development of International Standards.*

Baca, J. (2012). *Los conflictos socioambientales en las canteras de San Antonio de Pichincha.* Tesis para obtener el título de maestría en estudios socioambientales, Facultad latinoamericana de ciencias sociales. Quito, Ecuador. 9-10.

Bar, N., Barton, N., y Ryan, C. (2016). Application of the Q-slope method to highly weathered and saprolitic rocks in Far North Queensland. *EUROCK*. 1, 585-590.

Bell, F. (1992). *Engineering in Rock Masses.* Londres, Inglaterra: Butterworth-Heinemann.

Blázquez, L., y Beviá, J. (2000). *Manual de Carreteras Volumen II: construcción y mantenimiento. Ingeniería e Infraestructura de los transportes. Universidad de Alicante.* España: Ortiz e Hijos, Contratista de Obras.

Burbank, D., y Anderson. R. (2001). Tectonic Geomorphologic. *Blackwell Science Edit*. 274.

Caizaluisa, V., y Criollo, S. (2015). *Caracterización Geomecánica del Macizo rocoso para el plan de cierre y liquidación de las canteras ubicadas en las parroquias de San Antonio de Pichincha ("Fucusucu III") Y Píntag ("Esperanza".* Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el Título de Ingenierías en Geología Grado Académico de Tercer Nivel. Universidad Central del Ecuador, Quito.

Calderón, D. (2014). *Informe de la visita al Laboratorio de Mecánica de Rocas de la FIGMM. Mecánica de Rocas.* Universidad Nacional de Ingeniería. Departamento académico de Ingeniería Geotécnica, Lima, Perú, 10-12.

Cañadas, L. (1983). *Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador*. MAG – PRONAREG. Quito, Ecuador.

Castro, A., y Pérez, D. (2013). Correlaciones entre las clasificaciones geomecánicas Q y RMR en el túnel exploratorio de "la línea", cordillera central de Colombia. *Boletín Ciencias de la Tierra.* 34, 42-50. DOI 2357-3740.

Dearman, W. (1991). *Engineering Geological Mapping.* Department of Geotechnical Engineering. University of Newcastle upon Tyne. UK: Butterworth-Heinemann.

Deere, U., y Deere, W (1988). The rock quality designation (RQD) Index in Practice. Philadelphia, EU: American Society for Testing and Materials. 91-101.

Duque, P. (2000). *Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador.* Sistema de Información Geológica y Minera. Quito, Ecuador: PRODEMINCA.

Evelyn J. (2014). El desarrollo de San Antonio se frenó por cinco aspectos*. El comercio*. Obtenido de: http://www.elcomercio.com/actualidad/san-antonio-pichincha-mitad-mundo.html. (Junio, 2017).

Ganán, J. (2014). *Caracterización de un reservorio aplicando técnicas geoestadísticas para un campo del distrito amazónico.* Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero geólogo, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

García, E. (1985). Un parámetro geomecánico algo inquietante: El RQD. Sesión Técnica N°1, Reconocimientos Previos. *Simposio sobre Proyecto de Túneles*. 1, 1-13.

GEMM. (2007). *Movimientos en masa en la región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas.* Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Servicio Nacional de Geología y Minería. Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela.

Goodman, R. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. University of California at Berkeley. Second Edition. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.

Hudson, J., y Harrison, J. (2000). *An Introduction to the Principles. Engineering Rock Mechanics.* Londres, UK: Gray. 290-330.

Irfan, T. (1994). *Mineralogy and Fabric Characterization and Classification of Weathered granitic rocks in Hong Kong.* Hong Kong, China: Homantin, Kowloon.

Irfan, T., y Dearman, W., (1979). Micropetrographic and Engineering characterization of a weathered granite. *Annales de la societe Geologique de Belgique*. 101, 71-78.

Lavenu, A. (2006). Neotectónica de los andes entre 1°N y 47°S (Ecuador, Bolivia, Chile): una revisión. *Asociación Geológica de la Argentina*. 61(4), 504-506.

Lozano, A. (2009). Martillo Schmidt (Esclerómetro). *Geoengineering Services & Consulting E.I.R.L.* 1-4.

Mayra, P. (2014). La evaluación de 35 canteras de San Antonio, en manos del Cabildo. *El Comercio*. Obtenido de: http://www.elcomercio.com/actualidad/evaluacion-canteras-sanantonio-quito-municipio.html. [Mayo, 2017].

Pacheco, D. (2013). *Estudio Geológico de las Formaciones Cuaternarias en la Zona San Antonio de Pichincha – Pomasqui.* Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero geólogo, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Palmstrom, A. (2005). Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology.* 20, 362-377. http://www.sciencedirect.com.

Priest, S., y Hudson, J. (1976). Discontinuity Spacing in Rocks. Rock Mechanical. Great Britain: Pergamon Press. 13, 135-148.

Remy, N., Boucher, A., y Wu, J. (2009). *Applied Geostatistics with SGeMS, a user's guide*. New York. Estados Unidos: Cambridge.

Robin, C., Phillippe, J., Samaniego, P., Martin, H., y Hall, M. (2009). Evolution of the late Pleistocene Mojanda–Fuya Fuya volcanic complex (Ecuador), by progressive adakitic involvement in mantle magma sources. *Bull Volcanol.* 71, 233-250. DOI 10.1007/s00445-008-0219-9.

Soulas, J., Eguez, A., Yepes, H., y Perez, H. (1991). Tectónica active y riesgo sísmico en los Andes Ecuatorianos y el extremo Sur de Colombia. *Bol. Geol. Ecuat.* 2(1), 3-11.

Vallejo, G., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. España: Sonia Ayerra.

Villagómez, D. (2003). *Evolución geológica plio-cuaternaria del valle interandino central en ecuador (zona de Quito Guayllabamba- San Antonio).* Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero geólogo, Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.

Winckfll, A. (1982). *Relieve y Geomorfología del Ecuador*. Instituto Panamericano de Geografía e Historia sección natural del Ecuador.

Zenóbio, A., y Zuquette, V. (2004). RQI: proposal for the correction of R.Q.D. parameter for natural rock slopes- Serra de Ouro Presto (Minas Gerais, Brazil). *Landslides, evaluation and stabilization*. 1, 817-820.

Zhang, L. (2016).Determination and applications of rock quality designation (RQD). *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering.* 8, 389-397.