



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Caracterización del material rocoso mediante
granulometría e índice de carga puntual”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

CARLOS ANDRÉS UREÑA ERRÁEZ

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOO CALLE

CUENCA, ECUADOR

2021

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de tesis principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, a mi padre, Agustín Ureña (+), a pesar de no tenerle presente, siento que estás conmigo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para el como para mí.

A mi madre, Marina Erráez, por ser ese apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias me ha demostrado su cariño y se ha convertido en un pilar fundamental en mi vida.

A mi hija, Camila Valentina Ureña, por ser la persona que luchó día a día por compartir momentos significativos conmigo por siempre estar dispuesta a escucharme y ayudarme en cualquier momento.

A mis hermanos, Pither, Christian, Steven Ureña y Kevin Aguirre por haber estado junto a mi brindándome su apoyo.

A mi tía, Carmita Erráez, a la que quiero como a una madre la persona que siempre comparte momentos conmigo.

A mi tío, Mario Ureña, la persona que me ayudado mucho con sus consejos para seguir adelante en el transcurso de mi carrera profesional.

A mi gran amigo, Davis Cedillo, gracias a su apoyo me ayudo a lograr este objetivo con mucha perseverancia por demostrarme que podemos ser grandes amigos y compañero de trabajo a la vez.

De manera especial a Don Angelito Cedillo, por ser una persona luchadora que demostró ser fuerte ante las adversidades de la vida, por haberme ayudado en ciertos proyectos que necesitaba realizar en el trascurso de mi carrera Universitaria.

A todas las personas en especial que me apoyaron en esta etapa de mi vida, aportando en mí una formación profesional.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy gracias a Dios, por haber dado fuerza y valor para culminar esta etapa tan importante en mi vida, a mis padres por ser el apoyo incondicional que me han brindado en el trascurso de mi vida Universitaria.

Un agradecimiento especial a mi director de Tesis el Ingeniero Patricio Feijoo, por el tiempo, disponibilidad y enseñanza durante el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Leonardo Núñez, por su apoyo incondicional en el trascurso de mi carrera universitaria, por compartir momentos de alegría y demostrarme que siempre puedo compartir con él.

Al Ingeniero Eduardo Luna por toda la aportación que hizo posible el desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros y amigos que siempre me dieron una mano para brindándome su apoyo para culminar mi formación profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
1.1 Descripción de la zona de estudio.....	3
1.1.1 Ubicación geográfica	3
1.1.2 Accesos y vías de comunicación.....	4
1.1.3 Clima.....	4
1.2 Geología regional, local y georreferenciación	5
1.2.1 Geología regional	5
1.2.2 Geología local	7
1.3 Material rocoso	8
1.3.1 Comportamiento y ensayos de la matriz rocosa.....	8
1.3.2.1 Procesos de rotura	11
1.3.3 Macizo rocoso de la zona de estudio.....	13
1.4 Trituración.....	14
1.4.1 Trituración primaria	15
1.4.2 Trituración secundaria.....	16
1.4.3 Trituración terciaria.....	16
1.4.4 Trituradora de mandíbulas	17
1.5 Granulometría	18
1.5.1 Clasificación de las partículas minerales del suelo	19
1.5.2 Métodos de análisis granulométrico.....	20
1.5.3 Método del tamizado.....	20
1.5.4 Curva granulométrica.....	20

1.6 Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa	23
1.6.1 Resistencia a tracción de la matriz rocosa.....	25
1.6.2 Ensayo de carga puntual.....	25
CAPÍTULO II	27
 EXPERIMENTACIÓN	27
2.1 Número de muestras y preparación.....	27
2.2 Proceso de trituración	33
2.3 Clasificación granulométrica	35
2.3.1 Método de distribución de Schumann.....	45
2.4 Ejecución del Índice de Point Load Test	47
2.4.1 Comprobación de medidas de las muestras	48
2.4.2 Proceso de ruptura de muestras.....	49
2.4.3 Formulas del ensayo del Índice de Point Load Test	51
2.4.4 Aplicación de las fórmulas con datos de la muestra #10	52
CAPÍTULO III.....	54
 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	54
3.1 Análisis de resultados de curvas granulométricas	54
3.2 Análisis de resultados de modelos de distribución para el d80	56
3.3 Análisis de resultados del Índice de Point Load Test	58
3.4 Correlación del material rocoso	60
CONCLUSIONES.....	63
RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio.	3
Figura 1.2 Mapa de accesos y vías de comunicación.....	4
Figura 1.3 Mapa de la geología regional.....	7
Figura 1.4 Curva de tensión contra deformación.	10
Figura 1.5 Fracturación: a) nucleación de una grieta. b) crecimiento de una grieta. .	13
Figura 1.6 Esquemas de deslizamiento cristalino	13
Figura 1.7 Macizo rocoso.....	14
Figura 1.8 Diagrama de fuerzas de trituración.....	15
Figura 1.9 Trituradora de Mandíbulas.	18
Figura 1.10 Malla para tamices.....	20
Figura 1.11 Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal".	23
Figura 1.12 Compresión simple	23
Figura 1.13 Ensayo de carga puntual.	25
Figura 2.1 Mapa de ubicación de las muestras obtenidas.	27
Figura 2.2 Ubicación de Coordenadas UTM WGS84.	28
Figura 2.3. Zona de Estudio.	28
Figura 2.4. Corte de las muestras.	31
Figura 2.5. Altura de la muestra.....	31
Figura 2.6. Longitud de la muestra.	32
Figura 2.7. Ancho de la muestra.	32
Figura 2.8. Enumeración de las muestras.....	33
Figura 2.9. Peso de la muestra.	33
Figura 2.10. Trituradora de Mandíbulas R22.....	34
Figura 2.11. Disposición de la Muestra en la Trituradora.....	34
Figura 2.12. Peso de la muestra triturada.	35
Figura 2.13. Serie de tamices.	36
Figura 2.14. Clasificación en la tamizadora eléctrica.	37
Figura 2.15. Peso del tamiz #1/2.....	37
Figura 2.16. Peso del tamiz # 3/8.....	38
Figura 2.17. Peso del tamiz #4.....	38

Figura 2.18. Peso del tamiz #10.....	39
Figura 2.19. Peso del tamiz #16.....	39
Figura 2.20. Pasante acumulado.....	40
Figura 2.21 Curva granulométrica de la muestra #30.....	43
Figura 2.22 Curva granulométrica del modelo de Schumann.....	46
Figura 2.23 Puntas cónicas acopladas a la prensa Humboldt.....	47
Figura 2.24 Prensa Humboldt modelo CM-2500-DIR.....	48
Figura 2.25 Muestras de 5x5x5 cm.	48
Figura 2.26 Mediciones de las muestras con su relación $D=Y$ y $L=X$	49
Figura 2.27 Ubicación de la muestra entre las puntas cónicas.....	49
Figura 2.28 Resultado de la ruptura en la prensa Humboldt.....	50
Figura 2.29 Resultado de la fuerza ejercida en kN.	50
Figura 3.1 Curvas granulométricas sector "Cojitambo".	55
Figura 3.2 Modelo de Schumann.	57
Figura 3.3 Grafico de correlación entre el d_{80} y $I_s (50)$	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Rango de operación de la fragmentación.....	17
Tabla 1.2 Sistema de clasificación de las partículas minerales del suelo.	19
Tabla 1.3 Clasificación de los fragmentos de roca (>2mm).	19
Tabla 2.1 Dimensiones de las Muestras 5x10x5.....	29
Tabla 2.2 Dimensiones de las Muestras 5x5x5cm.	30
Tabla 2.3 Abertura de Tamices.	35
Tabla 2.4 Peso de los tamices vacíos	36
Tabla 2.5 Peso de los tamices con el material retenido.....	40
Tabla 2.6 Análisis granulométrico de la muestra #30.....	42
Tabla 2.7 Determinación del D80 de la muestra #30.....	43
Tabla 2.8 Datos obtenidos en el Excel para las variables del modelo de Schumann.	46
Tabla 2.9 Dimensiones de las muestras con sus respectivas fuerzas.	51
Tabla 2.10 Determinación del Índice de Point Load Test de la muestra #10.	53
Tabla 3.1 Resultado de la clasificación granulométrica de la muestra #1.	55
Tabla 3.2 Datos para la graficación del modelo de Schumann.	56
Tabla 3.3 Resultado del d80 de las 30 muestras mediante el modelo de Schumann.	58
Tabla 3.4 Resultados de Is(50) de las 30 muestras.	59
Tabla 3.5 Resultado de los cálculos del d80 y el Índice de Point Load Test.	60

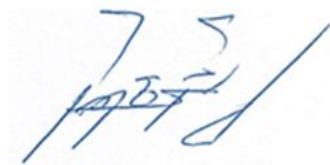
**“CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL ROCOSO MEDIANTE
GRANULOMETRÍA E ÍNDICE DE CARGA PUNTUAL”**

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la caracterización del material rocoso en el campo, mediante la clasificación granulométrica y el índice de carga puntual. Para la realización de los ensayos fue necesario la recolección de muestras de roca tipo andesita de la zona de Cojitambo, provincia de Cañar. Para este trabajo se elaboraron 30 muestras con dimensiones de 5x10x5 cm, las cuales fueron desarrolladas en un taller; sobre estas muestras se realizaron procesos de trituración y clasificación granulométrica, para finalmente determinar el d80. Además, se elaboraron 30 muestras adicionales con dimensiones de 5x5x5 cm, las que fueron sometidas a ruptura, mediante la adaptación de puntas cónicas a la prensa Humboldt; con este proceso se obtuvo el Índice de Point Load Test $Is_{(50)}$.

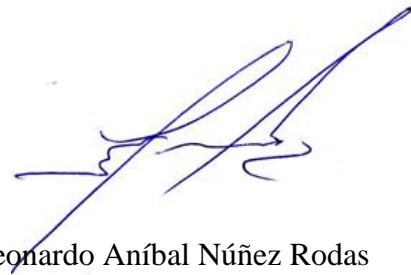
Finalmente se estructuró una gráfica para determinar la correlación entre los parámetros descritos, obteniendo como resultado final una fórmula para la caracterización del macizo rocoso.

Palabras claves: Clasificación granulométrica, $Is (50)$, material rocoso, trituración.



Ernesto Patricio Feijoo Calle

Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Carlos Andrés Ureña Erráez

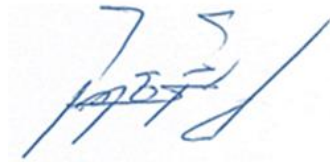
Autor

**“CHARACTERIZATION OF ROCK MATERIAL BY GRANULOMETRY
AND POINT LOAD INDEX”**

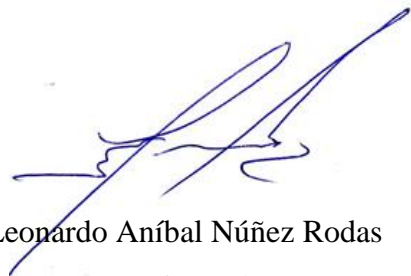
ABSTRACT

The objective of this investigation was to determine the characterization of the rocky material in the field, employing the granulometric classification and the point load index. To carry out the tests, it was necessary to collect samples of andesite-type rock from the Cojitambo area, Cañar province. For this work, 30 samples with dimensions of 5x10x5 cm were developed in a workshop; grinding and granulometric classification processes were carried out on these samples, to finally determine the d_{80} . In addition, 30 additional samples with dimensions of 5x5x5 cm were made, which were subjected to rupture, by adapting conical tips to the Humboldt press; With this process, the Point Load Test Index $I_s(50)$ was obtained. Finally, a graph was structured to determine the correlation between the described parameters, obtaining as a final result a formula for the characterization of the rock massif.

Keywords: granulometric classification, $I_s(50)$, rocky material, crushing.



Ernesto Patricio Feijoo Calle
Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Faculty Coordinator

Translated by



Carlos Andrés Ureña Erráez

Author



Carlos Andrés Ureña Erráez
Trabajo de Titulación
Ing. Ernesto Patricio Feijoo Calle
Abril, 2021

“Caracterización del material rocoso mediante granulometría e índice de carga puntual”

INTRODUCCIÓN

En la actividad minera es importante conocer las características del material rocoso. Existen muchos parámetros para describir e identificar cuantitativa y/o cualitativa sus propiedades básicas, para conocer estas propiedades es necesario enviar muestras al laboratorio, ya que no siempre se cuenta con los equipos necesarios para el análisis del material en campo. Un parámetro muy importante para determinar la caracterización del material rocoso es la resistencia a la compresión.

Hay que tener en cuenta que, para el análisis de la resistencia de rocas, en una explotación minera, es necesario enviar varias muestras para el análisis en el laboratorio, lo que genera un gasto económico a la mina, además de aquello, el reporte de los resultados por parte del laboratorio toma mucho tiempo según las disposiciones y la capacidad del mismo, lo que retrasa aún más el avance de la explotación.

Para mitigar todos estos problemas, el presente trabajo determinó la correlación entre la clasificación granulométrica determinando el d_{80} y el Índice de Point Load Test $IS_{(50)}$, con el objetivo de determinar la resistencia de la roca, tomando en cuenta que, si los datos obtenidos de esta correlación están entre los rangos determinados previamente, se obtendrá la resistencia de la roca y así, se evitara el envío de muestras al laboratorio, lo que permitirá el avance de la explotación de una manera más rápida y económica.

En este ensayo se pretende demostrar que esta relación se puede realizar en la mina, ya que algunas de ellas cuentan con equipos necesarios como una trituradora de mandíbulas y un juego de tamices, donde se podrá realizar la trituración primaria y la clasificación granulométrica para determinar el d_{80} .

Una vez obtenida la clasificación granulométrica, se determinará la correlación entre el d_{80} y el Índice de Point Load Test $IS_{(50)}$ de la roca propuesta, en este caso será la muestra rocosa proveniente de la zona del Cojitambo (Provincia de Cañar).

Finalmente, se obtendrá la ecuación correspondiente de la correlación antes mencionada que servirá como alternativa óptima, para la clasificación de macizos rocosos en los distintos campos de la ingeniería.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES E INFORMACIÓN PRELIMINAR

1.1 Descripción de la zona de estudio

1.1.1 Ubicación geográfica

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parroquia Cojitambo, dentro de la parte andina del Ecuador, con una superficie de 42 km². Se localiza al oeste del cantón Azogues, capital de la provincia del Cañar, con alturas que van desde los 2.600 a 3.000 m.s.n.m. y se encuentra a una distancia aproximada de 7 km en línea recta, desde la cabecera cantonal (Sinchi, 2014). El Cojitambo limita al norte, con la parroquia Biblián y parte con la parroquia San Francisco de Sageo; al sur, con la parroquia Javier Loyola; al este, con la parroquia urbana Azogues y parte con la parroquia Javier Loyola; y finalmente al oeste, con la parroquia Déleg (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

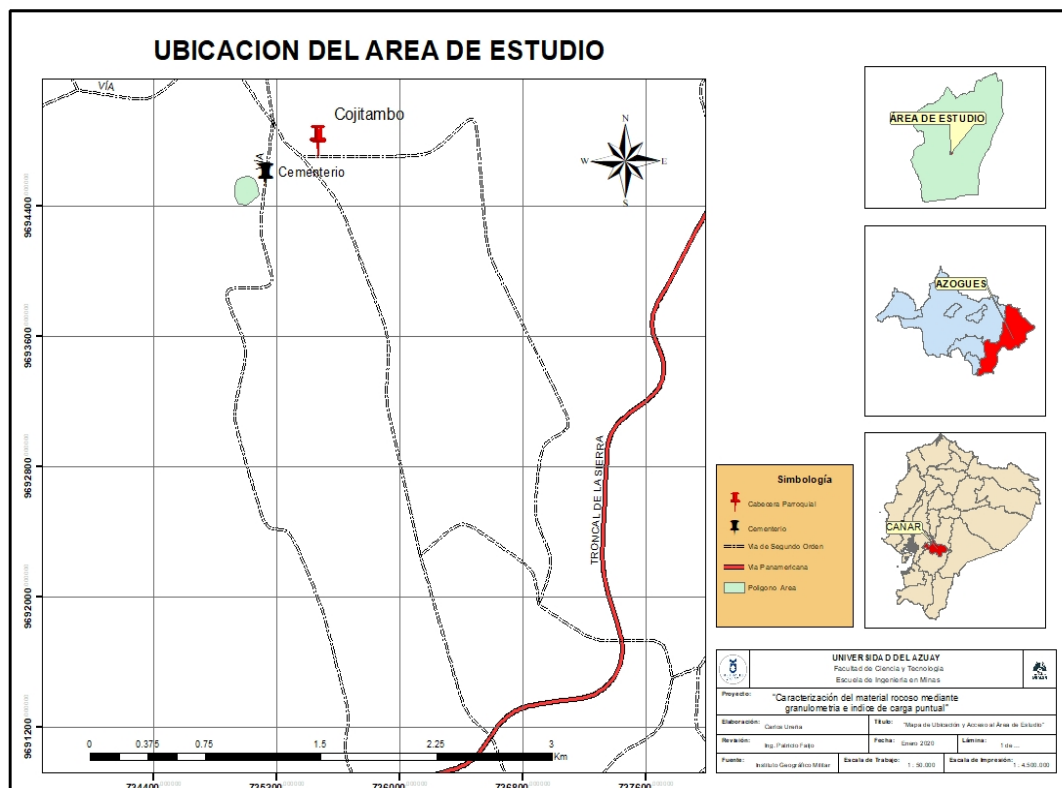


Figura 1.1 Mapa de la ubicación geográfica del área de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

1.1.2 Accesos y vías de comunicación

Para acceder a la cabecera parroquial existen tres vías principales; una que va desde Cuenca por Déleg; otra, una que va desde Azogues y una vía que sube desde la parroquia Javier Loyola; las dos últimas conectadas con la autopista Cuenca-Azogues. El resto de las vías que recorren la parroquia, son vías de segundo y tercer orden que conectan a todas las comunidades (Sinchi, 2014).

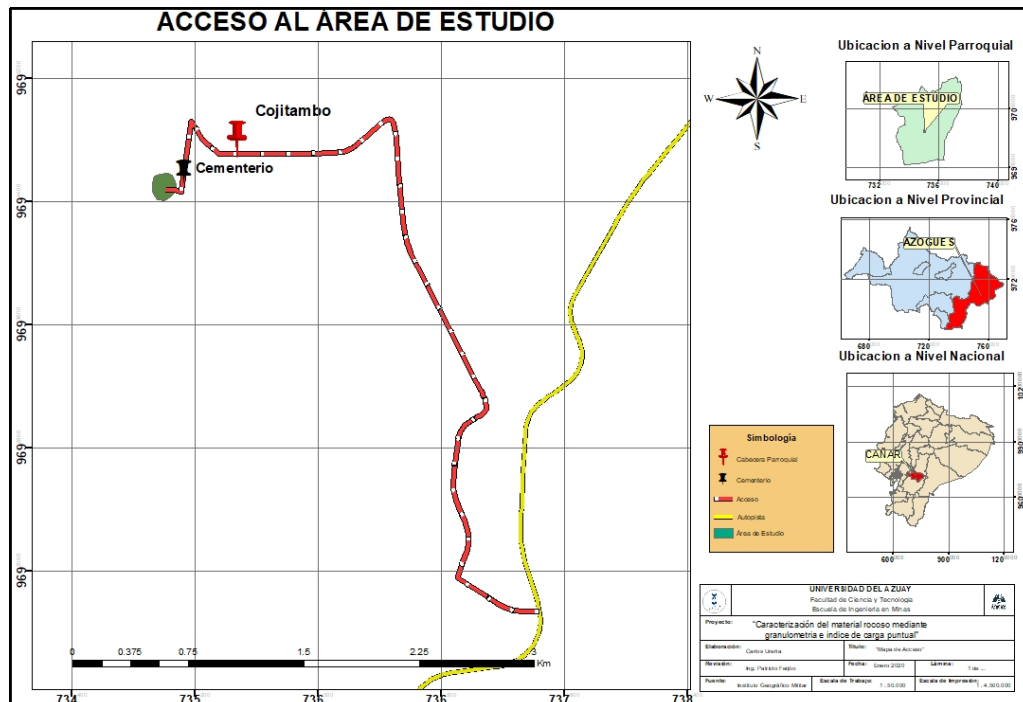


Figura 1.2 Mapa de accesos y vías de comunicación.
Fuente: Elaboración propia.

1.1.3 Clima

El clima para la parroquia Cojitambo corresponde a un clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo. Este clima presenta temperaturas medias anuales comprendidas entre 12 y 20° C; las temperaturas mínimas descienden rara vez a menos de 0° C y las máximas no superan los 30° C, podemos decir que la temperatura varía de acuerdo con la altura en la que nos situemos en el territorio (2520 m.s.n.m. punto más bajo de la parroquia y 3095 m.s.n.m. punto más alto del territorio parroquial) (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2 Geología regional, local y georreferenciación

1.2.1 Geología regional

Dentro de la región afloran las siguientes Formaciones geológicas, que las identificaremos por sus características geológicas, geotécnicas y geomecánicas:

1.2.1.1 Volcánicos Llaeo

– Comportamiento geotécnico

La compactación de estos materiales es alta gracias a fenómenos secundarios de desvitrificación de la ceniza que han cementado los depósitos y han disminuido aún más su baja permeabilidad original. El material es en general de alta resistencia al corte, puede disminuir esta característica con la humedad, especialmente en ciertos niveles de tobas caolínicas (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2.1.2 Miembro Guapán

– Litología

Parecida a la formación Loyola, pero con más aporte volcánico. Consiste en lutitas de color café oscuro a negro y hasta cremas. Localmente se observan tobas y areniscas tobáceas, así como bentonitas y estratos de yeso. Hay abundantes plantas fósiles (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

– Comportamiento geotécnico

Conjunto condicionado por discontinuidades y zonas físis. Movimientos en bloques o por saturación y disminución de la resistencia al corte en los finos o en los planos débiles (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2.1.3 Formación Loyola

– Litología

Formación sedimentaria clástica fina granular, consiste en una alternancia de lutitas gris oscuro muy físis, limolitas que meteorizan a arcillas de color blanco y habano, localmente lentes de areniscas limosas habanas finamente estratificadas con cemento calcáreo, calizas, y mega brechas (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

– **Comportamiento geotécnico**

Facie arenosa de mediana competencia, pero es poco representativa. Facie fina, es fisible con desarrollo de alteración residual hasta 3 m de espesor de expansividad, bajas propiedades mecánicas y un comportamiento de suelo, en referencia a la resistencia al corte; materiales colapsables en condiciones saturadas (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2.1.4 Formación Azogues

– **Litología**

Secuencia sedimentaria típicamente clástica. Areniscas tobáceas de grano medio a grueso café, amarillentas con capas de lutitas, limolitas y pocas intercalaciones de conglomerados. Se encuentra fauna de moluscos y restos de plantas (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

– **Comportamiento geotécnico**

Macizos competentes calificados como rocas IV-III, estables en pendientes mayores a 30°. Caída de bloques en fuertes pendientes o taludes de corte, algunos niveles lutíticos tienen comportamiento poco competente y pueden disminuir su resistencia al corte en condiciones húmedas a través de planos de debilidad preferenciales (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2.1.5 Formación Mangán

– **Litología**

Secuencia de limolitas, lutitas y areniscas fino-granulares, en su parte inferior todas de color claro; en su parte media se encuentran lutitas asociadas con vetas de carbón; en la parte superior aflora una arenisca tobácea gruesa café, que se hace conglomerática hacia arriba (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

– **Comportamiento geotécnico.**

En la Formación Mangán de alternancia fino-granular es dura-blanda, predominan los estratos físciles (ej. lutitas), en los cuales las condiciones de saturación disminuyen la resistencia al corte hasta la rotura. Sin embargo, en zonas con predominio de materiales físciles, todo el macizo puede estar involucrado en grandes zonas inestables cuando se desarrollan grandes presiones de poros (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

1.2.1.6 Formación Biblián

– Litología

Secuencia sedimentaria clástica. Alternancia de argilitas, limolitas rojizas interestratificadas con areniscas tobáceas de grano fino a y subangulares de la formación. Yunguilla, se observa yeso secundario en grietas (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

– Comportamiento geotécnico

El relieve favorece al desarrollo de la alteración residual. Las características de resistencia al corte disminuyen en condiciones mal drenadas y favorecen la rotura en contacto de los suelos con los horizontes menos alterados del macizo. Existen indicios de expansividad media alta, y alta plasticidad, lo que provoca una similitud con los materiales superficiales de la formación Loyola (Angulo, Calle, & Coronel, 2016).

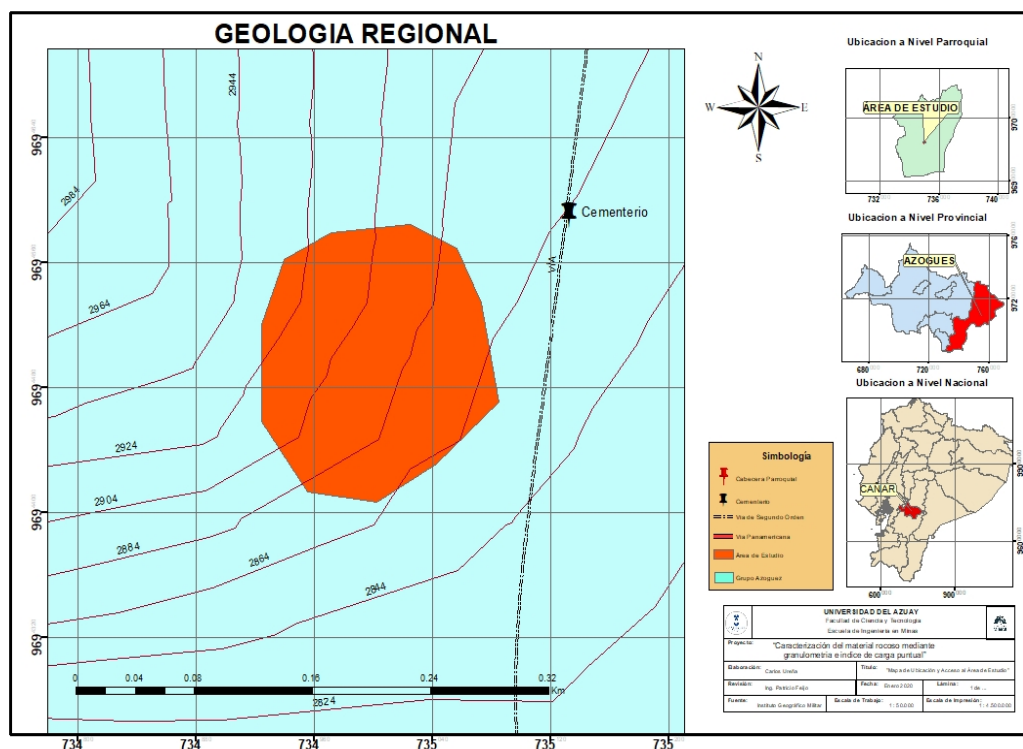


Figura 1.3 Mapa de la geología regional.

Fuente: Elaboración propia.

1.2.2 Geología local

En la zona de estudio afloran las Formaciones Biblián y Loyola pertenecientes al Terciario. La primera está formada por una manifestación ígnea, que atraviesa los

sedimentos por zonas de fracturas y descansa en discordancia sobre la Formación Celica. Los depósitos superficiales están representados por coluviones (Roura, 2010).

1.2.2.1 Formación Biblián

Se encuentra formada por una secuencia de lutitas de color verde, cremas y rojizas intercaladas por areniscas finas, y aglomerados con clastos desde semi angulares hasta redondeados. Aflora al este del Cojitambo y forma parte del anticlinal de Azogues. Esta Formación está intruída por un dique andesítico de rumbo norte – sur, que corta diagonalmente el anticlinal de Azogues, cuyos puntos más elevados son los cerros de Cojitambo y Shalal. La roca andesita es de color gris, con fenocristales de andesita, cristales de anfíbola y algunos cristales de mica, generalmente alterados y ocasionalmente, cuarzo (Roura, 2010).

1.2.2.2 Formación Loyola

Aflora al oeste del área en la parte baja en la coordenada 734.647 E – 9´695.075 N y está representada por una secuencia de lutitas y areniscas de color crema, amarillenta y rojizas. Erosionan con facilidad y se encuentra cubiertas por depósitos coluviales (Roura, 2010).

1.3 Material rocoso

1.3.1 Comportamiento y ensayos de la matriz rocosa

En la matriz rocosa, existen muchos parámetros para describir e identificar cuantitativa y/o cualitativa sus propiedades básicas. Estas propiedades, denominadas propiedades índices, son las que determinaran: la composición mineralógica y el comportamiento mecánico de la matriz (Galván, 2015).

Cuando se hace una descripción geológica de la roca, se incluye su nombre, mineralogía, textura, tipo de cementación y grado de alteración. La descripción petrográfica, se hace mediante el análisis de láminas delgadas, con la microscopía óptica electrónica y el empleo de técnicas de difracción de rayos X (Galván, 2015).

El estudio petrofísico, de la matriz rocosa nos permite interpretar sus propiedades físicas en función de sus componentes y características petrográficas (Poros, fisuras intergranulares, uniones, anisotropías, minerales, composición química, etc.) (Galván, 2015).

Dentro del comportamiento tenso-deformación de la matriz rocosa sus propiedades mecánicas permiten conocer las características tenso-deformación de la roca, sometida a esfuerzos determinados. Estas propiedades son de particular importancia para la resistencia a la compresión simple y la resistencia a tracción (Galván, 2015).

Por otro lado, el comportamiento tenso-deformación de la matriz rocosa está definido por la relación entre los esfuerzos aplicados y las deformaciones producidas, hace referencia a como se va deformando el macizo y a la variación del comportamiento del material a lo largo de la aplicación de la carga; permitiendo conocer: (Galván, 2015):

- El comportamiento antes de llegar a la rotura.
- La forma en que se produce la rotura.
- El comportamiento después de la rotura.

El estudio, se lleva a cabo a partir de ensayos de aplicación de fuerzas, en donde se registran las curvas de esfuerzo-deformación a lo largo de las etapas del proceso. Las rocas presentan relaciones lineales y/o no lineales entre las fuerzas aplicadas y las deformaciones producidas, obteniéndose diferentes tipos de curvas en relación a la tensión vs deformación para distintos tipos de rocas (Galván, 2015).

Si se aplica una carga y supera su resistencia de pico puede ocurrir: (Galván, 2015)

- La resistencia de la roca disminuye drásticamente, incluso hasta alcanzar un valor próximo a cero. (Es el caso de un comportamiento frágil).
- La resistencia de la roca decrece hasta un cierto valor después de haber alcanzado deformaciones importantes. (Es el caso de un comportamiento frágil-dúctil o parcialmente frágil).
- La deformación sigue aumentando sin que se pierda resistencia (esto es, que la resistencia permanece constante después de grandes deformaciones) por ejemplo el comportamiento dúctil.

Una roca presenta un comportamiento frágil, cuando su capacidad para resistir cargas disminuye al aumentar la deformación y también un comportamiento dúctil, cuando la roca conserva su resistencia a pesar de estar sujeta a deformaciones permanentes (Galván, 2015).

La mayoría de las rocas presentan un comportamiento frágil, más que dúctil, para las condiciones de presión y temperatura a las que normalmente están sometidas por ejemplo en obras civiles. Sin embargo, la ductilidad puede ser mayor en rocas meteorizadas, macizos rocosos diaclasados y rocas poco resistentes (Galván, 2015).

Al aumentar la presión de confinamiento en una probeta, se pasa de un comportamiento frágil a un comportamiento dúctil. La rotura frágil que se produce en rocas sometidas a tensiones de naturaleza violenta e incontrolada, esto se da por ejemplo cuando la rigidez de la prensa es menor que la probeta (escala de laboratorio) o cuando los estratos que cargan sobre las rocas son menos rígidos; la rotura frágil se produce al alcanzar la resistencia máxima (Galván, 2015).

En otras situaciones, se puede controlar la rotura de tal forma que sigan “trabajando” aún después de haber alcanzado su resistencia máxima (Galván, 2015).

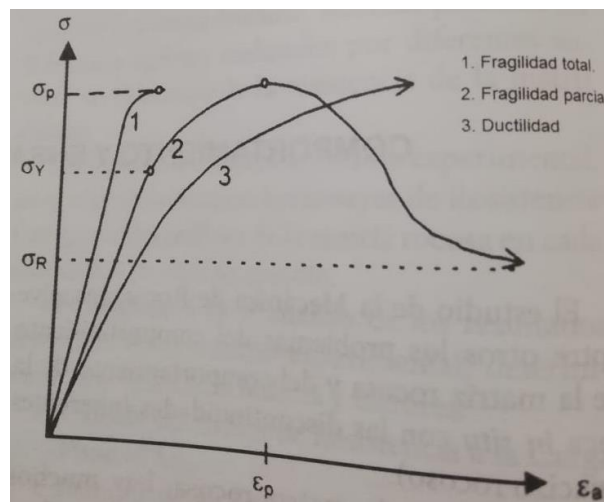


Figura 1.4 Curva de tensión contra deformación.

Fuente: (Galván, 2015)

La fragilidad de la roca viene definida por la pendiente de la curva tensión vs deformación a partir del punto de resistencia máxima (Galván, 2015).

La fragilidad viene dada por la siguiente fórmula:

$$\frac{\sigma_1^M - \sigma_1^R}{\varepsilon_1^R - \varepsilon_1^M} \quad (1)$$

Donde:

σ_1^M : es la resistencia máxima.

σ_1^R : es la resistencia residual.

ε_1^R y ε_1^M : son las respectivas deformaciones.

La curva de esfuerzo-deformación, en la rama ascendente, antes de alcanzar la resistencia pico, presenta un comportamiento lineal o elástico para la mayor parte de las rocas (Galván, 2015).

En el campo elástico, la deformación es proporcional al esfuerzo y se cumple la relación (Galván, 2015):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ax}} \quad (2)$$

Donde:

E : es el modelo de Young o de elasticidad.

σ : es el esfuerzo.

ε_{ax} : es la deformación axial.

Existe otra constante que define el comportamiento elástico del material rocoso, que es el módulo de Poisson (Galván, 2015):

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{ax}} \quad (3)$$

Donde:

ε_t : es la deformación transversal.

ε_{ax} : es la deformación axial.

1.3.2.1 Procesos de rotura

El proceso de rotura macroscópica de una roca es muy complejo y generalmente intervienen muchos fenómenos microscópicos que complican su comprensión y su tratamiento teórico (Galván, 2015).

- **Procesos de rotura macroscópica**

En la rotura macroscópica pueden considerarse los siguientes tipos:

- **Rotura por tracción:** Este tipo de rotura hace que una cierta sección de la roca esté sometida a una tracción pura o casi pura (Galván, 2015).
 - **Rotura por esfuerzo cortante:** Se produce cuando una parte de la superficie de la roca está sometida a esfuerzos cortantes suficientemente altos para que una cara de la superficie se deslice respecto a la otra (Galván, 2015).
 - **Rotura por compresión:** Se presenta en volúmenes de roca comprimidos intensamente. Microscópicamente se producen grietas de tracción y planos de corte que progresan delimitando el volumen fragmentado por “compresión”. Las rocas más densas bajo compresión isotrópica pueden colapsar bajo compresiones muy elevadas por su cambio de estructura cristalina (Galván, 2015).
 - **Rotura por flexión:** Se produce cuando una cierta sección de la roca está sometida a flexión. La sección está sometida a unas tensiones normales variables (Galván, 2015).
-
- **Procesos de rotura microscópica**

Los procesos de rotura a nivel microscópico se agrupan en los siguientes fenómenos:

- **Fracturas o formación de superficies libres:** Consiste en la apertura de una grieta con la formación de una superficie libre, para lo cual hay que aportar una “energía específica de superficie” por unidad de área creada o según el crecimiento de una grieta ya existente a causa de una tensión de tracción (Galván, 2015). En este fenómeno tiene gran importancia el efecto de concentración de tensiones en los extremos de la fisura.
- **Deslizamiento:** Se produce cuando por efecto de un cortante, un plano reticular, o una banda de planos se deslizan.

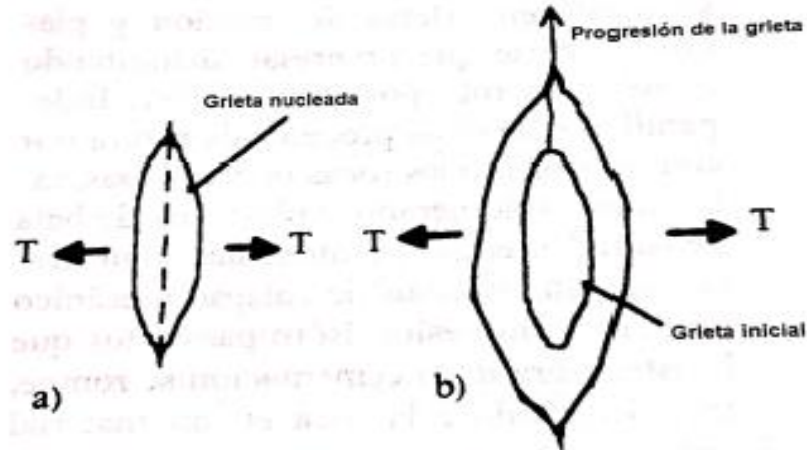


Figura 1.5 Fracturación: a) nucleación de una grieta. b) crecimiento de una grieta.
Fuente: (Galván, 2015)

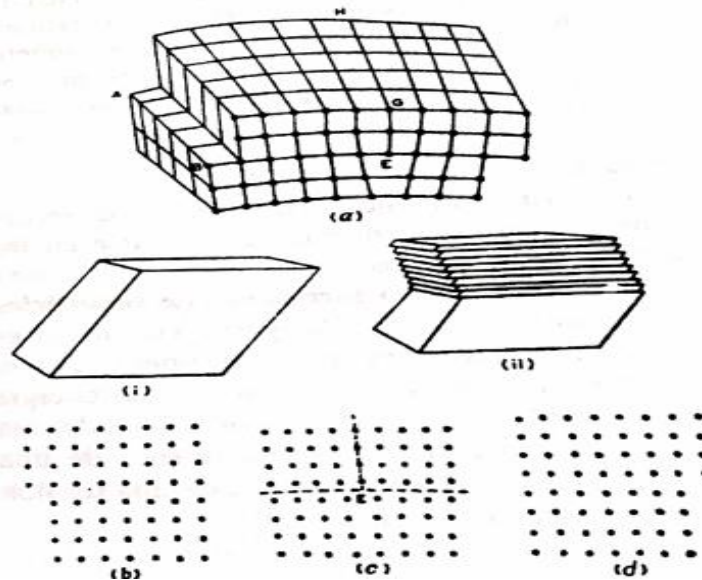


Figura 1.6 Esquemas de deslizamiento cristalino
Fuente: (Galván, 2015)

1.3.3 Macizo rocoso de la zona de estudio

El macizo rocoso por estudiar en un macizo de muy baja resistencia presenta terrenos cohesivos de mediana o baja consistencia. Este material rocoso está muy alterado y fragmentado, presenta rocas blandas incompetentes, las juntas son planares con bordes blandos y abiertos con relleno arcilloso de tipo V según Bieniawski. (Roura, 2010).



Figura 1.7 Macizo rocoso.
Fuente: Elaboración propia.

1.4 Trituración

Las operaciones de concentración de minerales en ciertos casos requieren de una preparación previa de los minerales, la cual se realiza en equipos denominados “Trituradoras”. Sin embargo, estas operaciones no solo consistirán en reducir de tamaño la roca mineral, sino será necesario obtener una granulometría adecuada para que se logre la liberación de la especie mineral (Galicia, 2010).

La trituración es un proceso de reducción de materiales comprendidos entre los tamaños de entrada que pueden ir desde 1 m de diámetro hasta 1 cm de diámetro. Según el tamaño de entrada de la partícula se diferencian diversos tipos de trituración los cuales son: trituración primaria que comprende tamaños de alimentación de 1 m de diámetro a 1 cm de diámetro y la trituración secundaria que comprende tamaños de entrada que van desde los 10 cm a 1 cm de diámetro. (Castillo & Jesús, 2011).

Durante la trituración, las fuerzas de compresión que actúan sobre las partículas pueden llegar a producir aglomerados que reducen la capacidad del equipo. Por lo tanto, este proceso generalmente se realiza en seco para evitar la presencia de cualquier aglomerante (Eslava, 2015) .

1.4.1 Trituración primaria

La trituración primaria reduce normalmente el tamaño del mineral a un valor comprendido entre 8" a 6". A continuación, los productos obtenidos se criban en un tamiz vibrante con el objetivo de separar aquellas partículas cuyo tamaño ya es lo suficientemente fino, para no generar una sobre-trituración y pasar a la siguiente etapa que es la trituración secundaria (Vera, 2015).

La trituración primaria se lleva a cabo normalmente en quebrantadoras de mandíbulas o en quebrantadoras giratorias. Las quebrantadoras de mandíbulas constan normalmente de dos planchas elaboradas de acero o de manganeso, colocadas una frente a la otra, de las cuales una es fija y la otra es móvil. La mandíbula fija puede girar sobre un eje situado en su parte superior o inferior, a través de un dispositivo que se une a la mandíbula móvil generando un movimiento de oscilación alternativo que va hacia adelante y hacia atrás (Vera, 2015).

El mineral se carga en el espacio comprendido entre las mandíbulas, la mandíbula móvil en su recorrido hacia adelante y hacia atrás fragmenta el material al momento de golpear la roca contra la mandíbula fija. Al retroceder la mandíbula móvil, el mineral triturado cae por la abertura ubicada en la parte inferior de la trituradora (Vera, 2015).

Por otra parte, las quebrantadoras giratorias constan de una placa de forma cónica que gira al interior de una carcasa circular fija, que posee aperturas en la parte superior e inferior respectivamente. El mineral que se va a triturar se carga en la quebrantadora por su parte superior, y en su interior que produce la fragmentación por el aplastamiento generado por el choque de las mandíbulas (Vera, 2015).

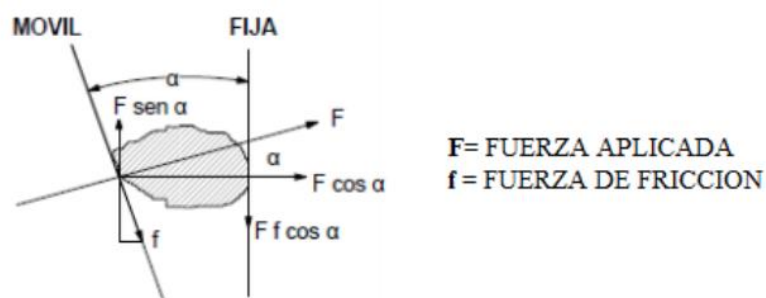


Figura 1.8 Diagrama de fuerzas de trituración.
Fuente: (Bustamante & Guillén, 2020).

La fuerza F generada por la quijada móvil, rompe a la roca en su punto de contacto, y esta se descompone en dos fuerzas, una normal aplicada a la quijada fija ($F \cos \alpha$) y otra fuerza vertical ($F \sin \alpha$) (Bustamante & Guillén, 2020).

El valor de la fuerza normal está dado por el coeficiente de fricción, el cual es variable, dependiendo de la naturaleza del mineral, siendo igual a la tangente del ángulo de fricción entre la roca y la quijada móvil. Teóricamente los dos puntos de contacto entre la roca y las quijadas poseen un coeficiente de fricción aproximado de 0,2 a 0,3 (Bustamante & Guillén, 2020).

1.4.2 Trituración secundaria

Partiendo del material proveniente de la trituración primaria, el tamaño de las partículas luego de la trituración comprende valores entre 3 y 2 pulgadas. En la trituración secundaria se utilizan quebrantadoras, que por lo general son de tipo giratorio o cónico. Estas máquinas son similares a las utilizadas en la trituración primaria, diferenciándose únicamente por las velocidades a las cuales el material es triturado (aproximadamente 500 rpm) y en que la abertura de salida es más estrecha que la abertura de salida de las trituradoras primarias. La trituración secundaria prepara el material para la trituración terciaria o para trabajar directamente en la etapa de molienda (Bustamante & Guillén, 2020).

1.4.3 Trituración terciaria

Aquí se fragmenta el producto de la trituración secundaria hasta tamaños que van desde 1/2 a 3/8 de pulgada. No siempre es utilizada, generalmente es reemplazada por la etapa de molienda. Para esta etapa se utilizan trituradoras giratorias y cónicas (Bustamante & Guillén, 2020).

Tabla 1.1 Rango de operación de la fragmentación.

	Tamaño de entrada	Tamaño de salida
Trituración primaria	Trozos grandes	<100 mm
Trituración secundaria	<100 mm	<25 mm
Trituración terciaria	<25 mm	< 10 mm
Molienda	<10 mm	Tamaño final

Fuente: (Bustamante & Guillén, 2020).

1.4.4 Trituradora de mandíbulas

A la trituradora de mandíbula también se le conoce con el nombre de trituradora de quijada. Es una máquina utilizada en la trituración primaria. El campo que más utiliza a las trituradoras de mandíbulas es el de la producción mineral e industrial. Estos procesos requieren de una trituración media o gruesa y se aplica a materiales de hasta 320 MPa de compresión (Eslava, 2015).

“La trituradora de mandíbulas con la que cuenta el laboratorio, tienen el objetivo de reducir el tamaño de las partículas, facilitando el proceso de molienda y la liberación de especies de interés” (Luna, 2016).

El funcionamiento de la cámara trituradora consiste en comprimir el material que ingresa a ella, con un movimiento similar a una quijada; con dos paredes, la una móvil y la otra fija. La pared móvil tritura el material contra la pared fija, que se abre y se cierra simultáneamente, este procedimiento ocurre entre 250 y 400 veces por minuto (Luna, 2016).



Figura 1.9 Trituradora de Mandíbulas.

Fuente: Elaboración Propia.

1.5 Granulometría

La granulometría es una propiedad del suelo que está íntimamente relacionada con su comportamiento, ya que tiene especial influencia sobre la aireación, retención y movimiento del agua, además según el tipo de suelo y granulometría se puede observar una mayor retención o disponibilidad de nutrientes (Gabriels & Lobos, 2010).

La fase sólida del suelo está compuesta de partículas minerales y orgánicas de diferentes formas y tamaños provenientes de la desintegración (meteorización) de las rocas y de la descomposición de los residuos vegetales. La forma espacial en que se encuentran las partículas minerales y orgánicas determina en gran parte las propiedades físicas del suelo, tales como: estructura, porosidad, densidad aparente y permeabilidad (Gabriels & Lobos, 2010).

Los términos granulometría y textura se utilizan a menudo como sinónimos; no obstante, el término textura se utiliza más frecuentemente para describir, la sensación que resulta de deslizar entre los dedos una muestra húmeda de suelo (textura al tacto) y su uso es muy común a nivel de campo como un primer diagnóstico del suelo, mientras que el análisis granulométrico se obtiene a través de pruebas de laboratorio (Gabriels & Lobos, 2010).

1.5.1 Clasificación de las partículas minerales del suelo

Se han desarrollado diferentes sistemas de clasificación de las partículas minerales del suelo con un diámetro equivalente menor de 2 mm, las cuales son consideradas como ‘tierra fina’ o ‘material fino’. Esta clasificación de las partículas minerales en el suelo se presenta en la siguiente tabla (Gabriels & Lobos, 2010).

Tabla 1.2 Sistema de clasificación de las partículas minerales del suelo.

		USDA	IUSS
		μm (micrómetros)	μm (micrómetros)
Arena	muy gruesa	2000-1000	-
	gruesa	1000-500	2000-200
	media	500-250	-
	fina	250-100	20-200
	muy fina	100-50	-
Limo		50-2	20-2
Arcilla		< 2	< 2

Fuente: (Gabriels & Lobos, 2010).

El término fracción gruesa del suelo engloba a las partículas mayores de 2 mm de diámetro y cuando esta fracción representa más del 40% del volumen de un suelo, este es definido por muchos autores como pedregoso o esquelético (Gabriels & Lobos, 2010).

Tabla 1.3 Clasificación de los fragmentos de roca (>2mm).

Forma y tamaño		
Fragmentos de roca irregulares, cubos angulares o subangulares, equiaxiales		
	2 – 5	Grava fina
	5 – 20	Grava media
Diámetro (mm)	20 – 75	Grava gruesa
	75 – 250	Guijarro
	250 – 600	Piedra
	> 600	Canto rodado
Fragmentos planos		
	2 – 150	Esquisto
Longitud (mm)	150 – 380	Laja
	380 – 600	Piedra
	> 600	Canto rodado

Fuente: (Gabriels & Lobos, 2010).

1.5.2 Métodos de análisis granulométrico

La separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños, resulta necesaria para la conocer su competencia y eficiencia, desde la perspectiva geotécnica. Esta acción comprende dos tipos de ensayos: por tamizado para las partículas gruesas (gravas y arenas) y el de sedimentación para partículas finas del suelo (limos y arcillas) (Escobar & Enrique, 2016).

1.5.3 Método del tamizado

Una vez secado el suelo mediante el uso del horno o simplemente por el aire, es pulverizado para que pueda pasar por una serie organizada de tamices, que poseen agujeros con tamaños conocidos que van en un orden decreciente es decir de arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar las pérdidas de partículas finas; el último tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente que no posee aberturas donde se recibe el material que no ha sido retenido por ningún tamiz (Escobar & Enrique, 2016).

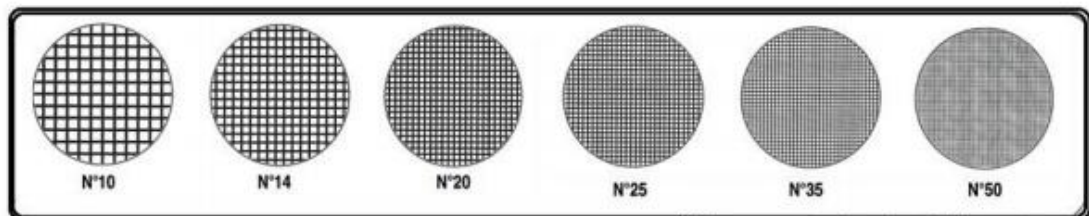


Figura 1.10 Malla para tamices.
Fuente: (Escobar & Enrique, 2016).

Con sacudidas horizontales y golpes verticales, mecánicos o manuales, se hace pasar el suelo por la serie de tamices, de arriba abajo, para luego pesar por separado el suelo retenido en cada malla (Escobar & Enrique, 2016).

1.5.4 Curva granulométrica

En las operaciones mineras, el macizo rocoso se llega a fragmentar mediante operaciones de voladura, las partículas minerales fragmentadas del macizo rocoso configuran un sistema particulado, este sistema posee propiedades individuales tales como: tamaño, composición, estructura y forma (Luna, 2016).

Posteriormente al proceso de fragmentación, el material que alimenta las operaciones de beneficio y extracción se encuentra conformado por partículas con una amplia gama de tamaños, es por ello, que la información obtenida a través del análisis granulométrico es necesaria para: planeamiento, seguimiento y control en el procesamiento mineral (Luna, 2016).

La manera más común de referirse al tamaño de partícula de un material; es definiendo la malla por donde el 80% de material pasa, esto es conocido como el d_{80} . (Luna, 2016). Por lo tanto, el objetivo del análisis granulométrico según el mismo autor es la obtención del material distribuido de acuerdo al tamaño de las partículas, las cuales son tomadas del suelo en forma de muestra.

Representación de distribución de tamaño de partículas (DTP)

Los fragmentos de minerales no están compuestos de partículas con un tamaño único, sino por varios tamaños. Para describir un sistema de partículas con un amplio intervalo de tamaño, se puede realizar a través del uso de funciones de densidad y de distribución. Debido a esto, es necesario usar funciones estadísticas (Luna, 2016).

La distribución de tamaños puede ser correlacionada por expresiones matemáticas, con un porcentaje en peso, es decir el peso de la muestra por cada tamiz, el mismo puede ser acumulado, retenido o pasante (Luna, 2016).

Existe una serie de funciones de distribución de tamaño, pero las más utilizadas son:

- **Función de distribución de Schumann**

La distribución de Schuman es la distribución más utilizada por los americanos, para representar los tamaños obtenidos por el tamizaje. Se compara el porcentaje acumulado pasante con el tamaño de la partícula (Luna, 2016).

La ecuación es:

$$F(X) = \left(\frac{x}{K_{Sch}} \right)^n \quad (4)$$

Donde:

$F(x)$: % en peso acumulado pasante por cada malla.

n : Parámetro de distribución.

K_{sch} : Constante de Schuhmann (Tamaño máximo de distribución).

X : Tamaño de partícula.

- **Función de distribución de Rosin Rammler**

En la distribución de tipo Rosin Rammler, a partir del análisis granulométrico se obtiene un conjunto de datos tales como: tamaño de partículas, su respectivo porcentaje de pasante acumulado, el modelo se presenta a través de la siguiente función (Luna, 2016):

$$F(X) = 1 - e \left\{ - \left(\frac{x}{K_{RR}} \right) \right\}^m \quad (5)$$

Donde:

m : Parámetro de distribución.

K_{RR} : Constante de Rosin Rammler (Tamaño característico de la distribución).

X : Tamaño de partícula.

- **Determinación del d80**

Al determinar el modelo que mejor se ajusta a 1, se calcula los diferentes porcentajes de material retenido. El d80 se refiere al tamaño que permite pasar el 80% en peso de la población de partículas. Estos datos obtenidos se reemplazarán en la ecuación de Schuhmann y Rosin Rammler (Luna, 2016).

Posterior a esto, teniendo en cuenta el peso total y los pesos retenidos, se procede a realizar la curva granulométrica, con los valores de porcentaje retenidos en cada malla que comprende diferentes aberturas o diferentes diámetros. Esta curva permite

visualizar la tendencia homogénea o heterogénea que poseen los tamaños de grano (diámetros) de las partículas. (Yepes, 2016).

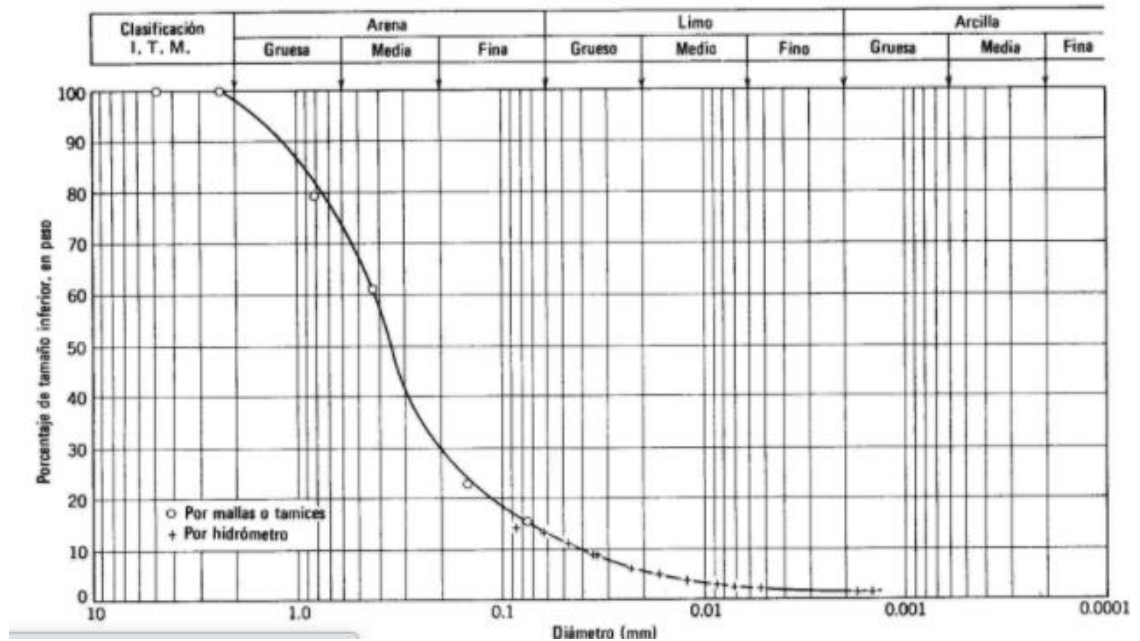


Figura 1.11 Curva granulométrica de un suelo areno-limoso, representado en un papel "log-normal".
Fuente: (Yepes, 2016).

1.6 Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa

Se entiende por resistencia a la carga específica (por unidad de sección), como la carga que es aplicada a un material para producir su rotura. Según el esfuerzo que se aplique la resistencia puede ser: a compresión, a tracción, a flexión, a corte, a torsión (Galván, 2015).

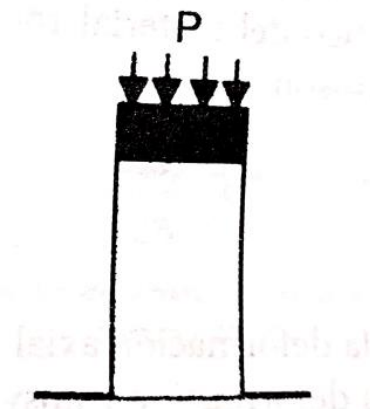


Figura 1.12 Compresión simple
Fuente: (Galván, 2015)

La resistencia a la compresión simple (o compresión uniaxial) de la matriz rocosa, es el valor que se obtiene cuando se aplica una carga de compresión en una dirección dada, sin aplicar ningún otro esfuerzo en ninguna otra dirección (Galván, 2015).

Se suele expresar con los símbolos: C_o ó σ_c

$$C_o = \frac{P}{A} \quad \text{ó} \quad \sigma_c = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Donde:

P: es la carga de rotura

A: la sección sobre la que se aplica

Cuando la roca presenta anisotropía, su resistencia compresiva ante la aplicación de esfuerzos así sea en la misma dirección, será diferente debido a los planos de anisotropía que posee la roca a estudiar (Galván, 2015).

Siguiendo el modelo de Morh-Coulomb, la resistencia es función de las fuerzas cohesivas y friccionales del material. La cohesión, es la fuerza de unión entre las partículas minerales que forman la roca (Galván, 2015).

El ángulo de fricción interna (ϕ), es el ángulo de rozamiento entre los planos de la misma roca, para la mayoría de las rocas este ángulo varía entre 25° a 45° .

La Resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa es un parámetro muy variable que depende de muchos factores (Galván, 2015):

Factores intrínsecos:

- Tipo de Roca.
- Grado de microfisuración.
- Porosidad y grado de alteración y/o meteorización.

Factores extrínsecos:

- Características del ensayo.
- Características de la muestra.
- La resistencia de la roca es una propiedad que también depende del tiempo.

1.6.1 Resistencia a tracción de la matriz rocosa

La resistencia a tracción simple de la matriz rocosa es el valor que se obtiene cuando se aplica una carga de tracción en una dirección dada, sin aplicar ningún otro esfuerzo en ninguna otra dirección (Galván, 2015).

Se expresa con símbolos: T_o ó σ_t

$$T_o = \frac{T}{A} \quad \text{ó} \quad \sigma_t = \frac{T}{A} \quad (7)$$

Donde:

T: Carga de rotura.

A: La sección sobre la que se aplica.

1.6.2 Ensayo de carga puntual

Algunas veces no se dispone del suficiente material para preparar probetas adecuadas según las normas establecidas para el desarrollo de los ensayos de compresión simple. Otro caso se produce cuando el número de ensayos a realizar es muy grande que no resulta factible el transporte de muestras, sino es más conveniente elaborar las muestras “*in situ*”. En ambos casos el ensayo indirecto de carga puntual puede sustituir al de compresión simple (Ramírez & Monge, 2004).



Figura 1.13 Ensayo de carga puntual.

Fuente: (Ramírez & Monge, 2004).

Este ensayo consiste en aplicar una carga puntual sobre el eje longitudinal de la probeta, para estimar el índice de carga puntual (I_s) en MPa, la información conceptual presentada por (González de Vallejo, 2002), indica que:

$$I_s = \frac{P}{D^2} \quad (8)$$

Donde P es la carga de ruptura y D el diámetro de la probeta. La longitud del testigo debe ser, como mínimo 1,5 veces el diámetro. La correlación entre el I_s y la resistencia a compresión simple de la roca (σ_c) es:

$$\sigma_c = 23 \times I_{s(50)} \quad (9)$$

Donde β es un factor experimental que varía según la litología de la roca y el diámetro de la muestra (Kahraman, 2001).

El subíndice $I_s (50)$ hace referencia a que la correlación es aplicable cuando el ensayo de carga puntual es realizado en una probeta estándar de 50 mm de diámetro. Para diámetros distintos a 50mm se debe multiplicar el factor I_s por un factor de correlación F , que se determina a partir de la siguiente expresión:

$$I_{s(50)} = F * I_s \quad (10)$$

CAPÍTULO II

EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo, se dará una explicación detallada de las operaciones realizadas para lograr los objetivos establecidos en el presente trabajo. Para empezar, se proporcionará el número de muestras utilizadas, proceso de corte, trituración, clasificación, desarrollo del índice de carga puntual y finalmente la resistencia a la compresión simple. Cabe recalcar que el área de estudio se encuentra ubicada en la zona del Cojitambo.



Figura 2.1 Mapa de ubicación de las muestras obtenidas.

Fuente: Elaboración propia.

2.1 Número de muestras y preparación

Primero se realizó la toma de 60 muestras correspondientes al área del Cojitambo, obteniendo las siguientes coordenadas: este 734978 y norte 9694479 como se muestran en las figuras (2.2 y 2.3).



Figura 2.2 Ubicación de Coordenadas UTM WGS84.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.3. Zona de Estudio.
Fuente: Elaboración propia.

Luego, las muestras fueron llevadas a un taller para ser cortadas, hasta obtener 30 muestras con dimensiones de 5x10x5 cm aproximadamente y también fueron elaboradas 30 muestras con dimensiones de 5x5x5 cm, siendo las dimensiones adecuadas para la elaboración del proyecto, las mismas que se pueden observar en las siguientes tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Dimensiones de las Muestras 5x10x5.

MEDIDAS							
#Muestras	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)	#Muestras	X(cm)	Y(cm)	Z(cm)
1	4.9	4.9	10.05	16	4.9	4.89	9.9
2	4.89	4.9	9.9	17	5	4.9	9.89
3	4.93	4.9	9.99	18	4.89	4.92	10.1
4	4.89	4.92	9.99	19	4.9	4.9	10.2
5	5	4.9	10	20	4.99	4.9	9.9
6	4.91	4.85	10	21	4.92	5	9.99
7	4.9	4.93	10.1	22	4.9	4.92	9.9
8	4.9	4.91	9.9	23	5	4.9	9.9
9	4.9	5.1	10	24	4.85	4.91	10
10	4.8	4.9	9.88	25	4.92	4.95	9.82
11	4.89	4.95	10	26	5.2	4.89	10.05
12	4.9	4.98	10.1	27	4.9	4.87	9.85
13	4.92	4.92	9.85	28	4.86	5	10.1
14	4.9	4.95	10	29	5	4.92	9.95
15	4.89	4.9	9.92	30	4.89	5	9.89

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.2 Dimensiones de las Muestras 5x5x5cm.

Medidas Muestras							
#Muestras	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	#Muestras	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)
1	4.9	5.13	4.89	16	4.89	5	5
2	4.9	4.9	4.85	17	4.9	5	4.85
3	4.91	5	5	18	4.89	5.05	4.89
4	4.9	5	4.8	19	4.92	5.02	4.88
5	4.85	5.02	4.85	20	4.91	4.91	4.83
6	5	5	4.9	21	4.95	5	4.98
7	4.9	5	4.89	22	4.9	5.1	4.85
8	4.9	5.1	4.85	23	4.95	5.08	4.75
9	5	5	4.95	24	4.92	4.95	4.85
10	4.9	4.95	4.91	25	5	5.02	4.95
11	4.91	4.95	4.8	26	4.9	4.9	4.85
12	4.9	5.05	4.9	27	4.95	5	4.89
13	4.9	5	4.88	28	4.95	5.1	4.9
14	4.88	5	4.85	29	4.95	5.02	4.89
15	4.9	5	4.9	30	4.92	4.98	4.89

Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado el corte de las muestras en el taller, el resultado final es el siguiente:



Figura 2.4. Corte de las muestras.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.5. Altura de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.6. Longitud de la muestra.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.7. Ancho de la muestra.
Fuente: Elaboración propia.

Se utilizará las 30 primeras muestras con dimensiones de 5x10x5 cm, para el proceso de trituración y clasificación para la determinación del d80.



Figura 2.8. Enumeración de las muestras.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Proceso de trituración

A partir de las muestras elaboradas en el taller, se procedió a pesarlas antes y después del proceso de trituración, con el objetivo de poder determinar la pérdida de material al momento de ser triturada.

Para la fragmentación de la muestra se utilizó una trituradora de mandíbulas, que permitió la disminución del tamaño de los fragmentos para su posterior clasificación.



Figura 2.9. Peso de la muestra.

Fuente: Elaboración propia.

Se debe colocar la muestra dentro de la trituradora de mandíbulas de forma horizontal como se muestra en la figura 2.11, con el fin de obtener un resultado lo más homogéneo posible.



Figura 2.10. Trituradora de Mandíbulas R22.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.11. Disposición de la Muestra en la Trituradora.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez ya trituradas las muestras se obtuvieron los fragmentos con diferentes tamaños, posterior a ello fueron pesadas cada una de las muestras para luego continuar con el proceso de clasificación.



Figura 2.12. Peso de la muestra triturada.
Fuente: Elaboración propia.

2.3 Clasificación granulométrica

Para realizar la clasificación granulométrica se procedió a tomar las muestras trituradas y colocarlas en una serie de tamices (TYLER), el juego de tamices fue colocado en una tamizadora eléctrica propiedad del laboratorio de Suelos de la Universidad del Azuay, por un tiempo constante de 2 minutos para todas las muestras.

Para esta clasificación se utilizó una serie de tamices con las siguientes aberturas:

Tabla 2.3 Abertura de Tamices.

# Tamiz (pulg)	# Tamiz (mm)
1/2	12.5
3/8	9.5
4	4.75
10	2
16	1.18

Fuente: Elaboración Propia.

La serie de tamices se observa en la siguiente figura:



Figura 2.13. Serie de tamices.

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla (2.4) se puede observar los pesos propios de cada tamiz, sin la presencia de material, obteniendo los siguientes valores.

Tabla 2.4 Peso de los tamices vacíos

PESO TAMICES	
# Tamiz (mm)	Peso (kg)
12.5	0.796
9.5	0.786
4.75	0.758
2	0.695
1.18	0.63
Pan Fondo	0.489

Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.14. Clasificación en la tamizadora eléctrica.
Fuente: Elaboración propia.

Después de depositar las muestras dentro de los tamices y ser agitados por un periodo de dos minutos, se realizó el pesaje de cada tamiz con la muestra retenida, para evitar la pérdida del material que en algunos casos quedaba retenido dentro de los tamices.



Figura 2.15. Peso del tamiz #1/2.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.16. Peso del tamiz # 3/8.
Fuente: Elaboración propia.

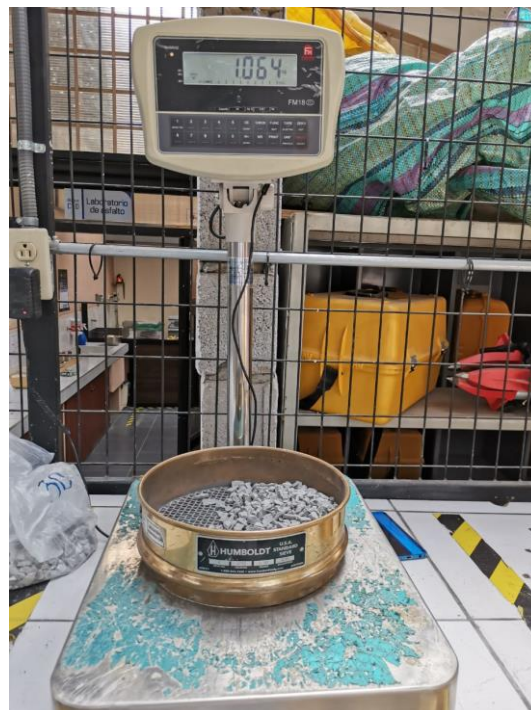


Figura 2.17. Peso del tamiz #4.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.18. Peso del tamiz #10.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.19. Peso del tamiz #16.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.20. Pasante acumulado.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.5 Peso de los tamices con el material retenido.

#Muestra	12.5 mm (kg)	9.5 mm (kg)	4.75 mm (kg)	2.00 mm (kg)	1.18 mm (kg)	Fondo (kg)
1	0.832	0.865	1.032	0.782	0.654	0.559
2	0.81	0.863	1.041	0.782	0.654	0.55
3	0.811	0.85	1.075	0.783	0.654	0.549
4	0.831	0.85	1.055	0.785	0.654	0.55
5	0.829	0.862	1.053	0.781	0.653	0.55
6	0.822	0.855	1.054	0.783	0.654	0.553
7	0.824	0.863	1.048	0.78	0.652	0.546
8	0.832	0.871	1.047	0.777	0.65	0.545
9	0.838	0.854	1.049	0.782	0.652	0.545

10	0.811	0.863	1.045	0.784	0.654	0.551
11	0.814	0.86	1.064	0.788	0.656	0.554
12	0.812	0.85	1.064	0.793	0.657	0.556
13	0.86	0.869	1.017	0.778	0.652	0.547
14	0.815	0.876	1.033	0.784	0.653	0.548
15	0.844	0.842	1.042	0.782	0.652	0.548
16	0.83	0.866	1.05	0.783	0.651	0.543
17	0.823	0.849	1.042	0.788	0.655	0.556
18	0.828	0.85	1.053	0.788	0.653	0.552
19	0.815	0.859	1.06	0.785	0.654	0.548
20	0.814	0.86	1.063	0.788	0.652	0.546
21	0.823	0.853	1.07	0.785	0.655	0.554
22	0.842	0.869	1.048	0.773	0.651	0.541
23	0.819	0.873	1.048	0.783	0.655	0.552
24	0.834	0.837	1.058	0.789	0.655	0.553
25	0.828	0.849	1.053	0.786	0.653	0.552
26	0.806	0.89	1.044	0.788	0.653	0.551
27	0.839	0.847	1.036	0.787	0.654	0.554
28	0.831	0.873	1.03	0.776	0.652	0.548
29	0.807	0.861	1.046	0.79	0.655	0.552
30	0.826	0.873	1.042	0.783	0.651	0.553

Fuente: Elaboración propia.

Luego de efectuar todos los pasos antes mencionados se procedió a calcular el d80 equivalente al tamaño del material que puede pasar el 80% del peso total de la población de partículas. Para ello, fue necesario la utilización de distintas fórmulas para determinar los diferentes parámetros que se presentan en la tabla 2.6, con el objetivo de determinar el análisis granulométrico en cada una de las 30 muestras

Para elaborar cada curva granulométrica, se utilizó el software Excel, para de esta manera poder interpretar todos los datos obtenidos en las diferentes muestras.

Tabla 2.6 Análisis granulométrico de la muestra #30

No TAMIZ	MALLA (mm)	PESO TAMIZ (kg)	PESO TAMIZ Y RETENIDO (kg)	PESO PARCIAL (kg)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
1/2	12.5	0.796	0.826	0.03	5.23	5.23	94.77
3/8	9.5	0.786	0.873	0.087	15.16	20.38	79.62
4	4.75	0.758	1.042	0.284	49.48	69.86	30.14
10	2	0.695	0.783	0.088	15.33	85.19	14.81
16	1.18	0.63	0.651	0.021	3.66	88.85	11.15
FONDO		0.489	0.553	0.064	11.15	100.00	0.00
TOTAL				0.57	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el análisis se trabajó con tamices de granulometría gruesa, los mismos que fueron proporcionados por el laboratorio.

EL PESO DEL TAMIZ CON MATERIAL (kg), es el valor que se obtiene luego del utilizar la tamizadora eléctrica, y pesar cada uno de los tamices. Para el cálculo de los distintos porcentajes se utilizó el software Excel, acompañado de las siguientes formulas.

- El peso parcial se obtuvo de la siguiente manera:

$$\text{PESO PARCIAL} = \text{PESO TAMIZ Y RETENIDO} - \text{PESO TAMIZ} \quad (11)$$

- **% RETENIDO:** Porcentaje en masa del suelo retenido en cada tamiz.

$$\% \text{ RETENIDO} = \frac{\text{PESO PARCIAL}}{\Sigma \text{ TOTAL DEL PESO PARCIAL}} * 100 \quad (12)$$

- **% RETENIDO ACUMULADO:** Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas que presentan mayor tamaño que la abertura del tamiz. Se calcula como la suma de todos los porcentajes parciales retenidos en los tamices de abertura de mayor tamaño, más el porcentaje parcial de lo retenido en ese tamiz (Bustamante & Guillén, 2020).

$$\% \text{ RETENIDO ACUMULADO} = \frac{\% \text{ RETENIDO TAMIZ\#1}}{\% \text{ RETENIDO TAMIZ\#2}} + \% \text{retenido tamiz\#3} \quad (13)$$

- PASANTE ACUMULADO:** Corresponde al porcentaje en masa de todas las partículas de menor tamaño que la abertura de un determinado tamiz. Se calcula entre 100 y el porcentaje retenido en ese tamiz (Bustamante & Guillén, 2020).

$$\% \text{PASANTE ACUMULADO} = 100 - \% \text{RETENIDO ACUMULADO} \quad (14)$$

Una vez realizado los cálculos se obtiene la siguiente curva granulométrica:

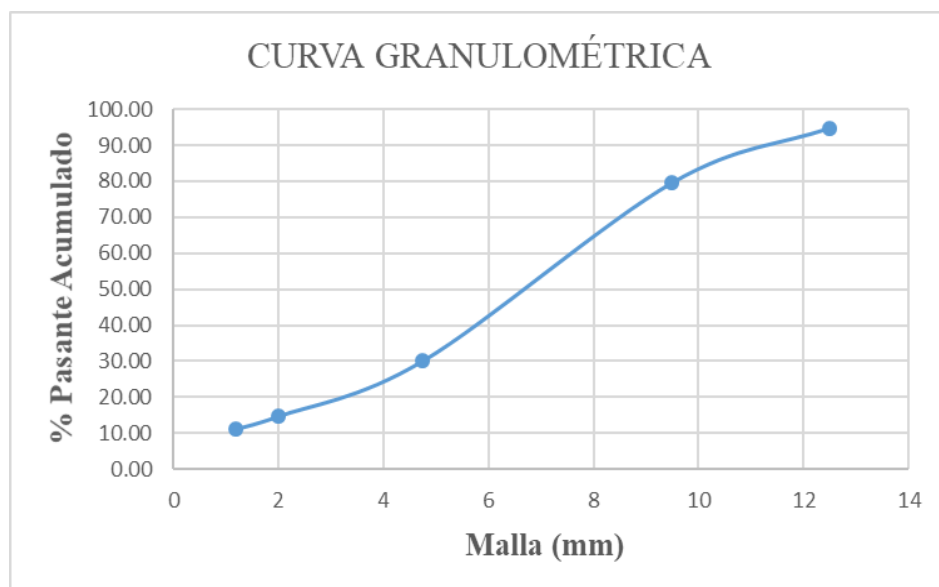


Figura 2.21 Curva granulométrica de la muestra #30

Fuente: Elaboración propia.

Después de haber obtenido estos resultados procedemos a trabajar con un modelo estadístico conocido como el modelo de Schumann para calcular el d80.

Tabla 2.7 Determinación del D80 de la muestra #30.

Malla	Tamaño malla (µm)	Peso Retenido (g)	Fracción Retenida f(x)	Fracción pasante acumulada F(x)	Fracción Retenida acumulada R(x)	Schumann	
						Y	X
						Log F(x)	log (x)
+ 1/2	12500	0	0	1	0	0	4.09691001
-1/2+3/8	12500	30	0.052265	1	0	0	4.09691001
-3/8+4	9500	87	0.151568	0.947735192	0.052265	-0.023312993	3.97772361
-4+10	4750	284	0.494774	0.796167247	0.203833	-0.098995692	3.67669361

-10+16	2000	88	0.15331	0.301393728	0.698606	-0.520865789	3.30103
-16	1180	21	0.036585	0.148083624	0.851916	-0.829492967	3.07188201
	600	64	0.111498	0.111498258	0.888502	-0.952731918	2.77815125
		574	1	0	1		

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se explicará detalladamente la obtención de las fórmulas para cada uno de los parámetros expuestos en la tabla 2.7

- **Fracción retenida $f(x)$ %:** es la relación entre la masa retenida y la masa total. Se puede expresar en fracción o porcentaje. En la medición de la masa total después del tamizado se toma el valor de la masa retenida en cada malla, la suma de todas las fracciones da como resultado 1 o en porcentaje 100% (Lojano & Pinguil, 2019).

$$f(x)\% = \left(\frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}} \right) * 100 \quad (15)$$

- **Fracción Pasante Acumulada:** es la diferencia de la unidad con la fracción retenida acumulada (Lojano & Pinguil, 2019).

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^n xi \quad (16)$$

- **Fracción Retenida Acumulada:** es la sumatoria de las fracciones retenidas en cada malla (Lojano & Pinguil, 2019).

$$R(x) = \sum_{i=1}^n xi \quad (17)$$

2.3.1 Método de distribución de Schumann

En este método se considera el porcentaje acumulado en cada malla para su posterior comparación con el tamaño de partícula, es la distribución más aplicada para presentar la distribución de tamaños obtenidos por tamizaje (Lojano & Pinguil, 2019).

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}}\right)^n \quad (18)$$

Donde:

$F(x)$: % en peso acumulado pasante por cada malla.

n : Parámetro de Distribución.

K_{sch} : Constante de Schumann (Tamaño máximo de distribución).

x : Tamaño de partícula.

Para utilizar el modelo de Schumann se grafica los valores presentados en la tabla 2.7. Estos valores resultantes son empleados para realizar una linealización del tramo recto de la gráfica, tomando en referencia la ecuación de la recta.

$$y = mx + b \quad (19)$$

Para poder interpretar el modelo de Schumann es necesario trabajar con la ecuación (18) y realizar una regresión utilizando logaritmos como se presenta a continuación:

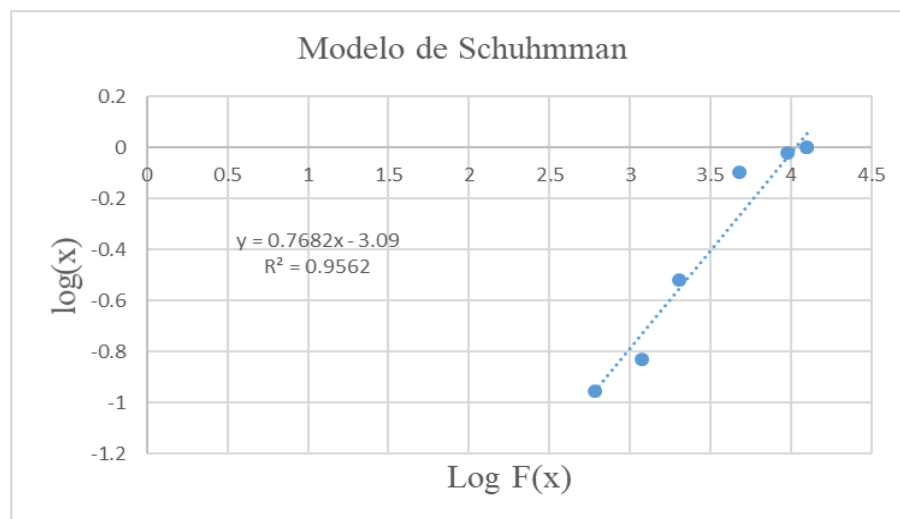
$$\text{Log}(F(x)) = n\text{Log}(x) - n\log(K_{sch}) \quad (20)$$

Tabla 2.8 Datos obtenidos en el Excel para las variables del modelo de Schumann.

Schumann	
Y	X
Log F(x)	log (x)
0	4.09691001
0	4.09691001
-0.02331299	3.97772361
-0.09899569	3.67669361
-0.52086579	3.30103
-0.82949297	3.07188201
-0.95273192	2.77815125

Fuente: Elaboración propia.

Se utilizan los valores de la linealización obtenidos en la ecuación de la recta, para determinar el modelo de Schumann.

**Figura 2.22** Curva granulométrica del modelo de Schumann.

Fuente: Elaboración Propia

En esta aproximación se obtiene el valor de n y K_{Sch}

$$\text{Log}(F(x)) = 0.7682\text{Log}(x) - 3.09\log(K_{Sch}) \quad (21)$$

En donde $n = 0.7682$ (pendiente de la sección lineal) y $n\log(K_{Sch}) = 3.09$

$$K_{Sch} = 10^{\frac{3.09}{n}} = 10^{\frac{3.09}{0.7682}} = 10529.069 \quad (22)$$

De esta manera se define el modelo de Schumann como:

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}}\right)^n = \left(\frac{x}{10529.069}\right)^{0.7682} \quad (23)$$

2.3.2 Determinación del d80 del alimento

Después, de haber determinado la pendiente procedemos a calcular el d80 para cada muestra:

$$0,8 = \left(\frac{x}{10529.069}\right)^{0.7682}$$

$$0.74790 = \left(\frac{x}{10529.069}\right)$$

$$X = 7874.77\mu\text{m}$$

$$X = 7.87477\text{mm}$$

2.4 Ejecución del Índice de Point Load Test

Para la ejecución del ensayo del Índice de Point Load Test, se utilizó dos puntas cónicas que fueron acondicionadas a una prensa hidráulica, perteneciente al laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad del Azuay.



Figura 2.23 Puntas cónicas acopladas a la prensa Humboldt.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.24 Prensa Humboldt modelo CM-2500-DIR
Fuente: Elaboración propia.

2.4.1 Comprobación de medidas de las muestras

Luego de acoplar la prensa Humboldt con las puntas cónicas, se procedió a trabajar con 30 muestras con dimensiones de 5x5x5cm (Figura 2.25), a cada una las muestras se le midieron los ejes X y Y, para realizar la siguiente relación: $\frac{Y}{X}$, obteniendo un resultado entre 1 a 1.4 para cada muestra. Para dicha relación se tiene en cuenta el largo del núcleo ($L = X$) y el diámetro ($D = Y$) (Figura 2.26).



Figura 2.25 Muestras de 5x5x5 cm.
Fuente: Elaboración propia.

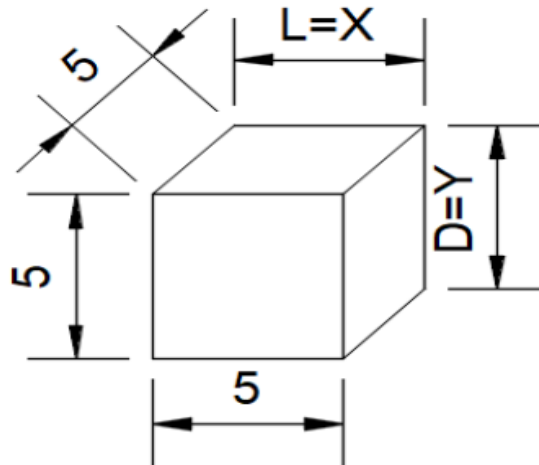


Figura 2.26 Mediciones de las muestras con su relación $D=Y$ y $L=X$.
Fuente: (Rodríguez, 2021)

2.4.2 Proceso de ruptura de muestras

Una vez establecido lo mencionado anteriormente para obtener la relación, se procedió a marcar con puntos intermedios entre la parte superior y la parte inferior de la muestra, para así poder colocar de manera correcta la muestra entre las puntas cónicas (Figura 2.27). Luego se realizó la ruptura en la prensa Humboldt, empleando una fuerza (kN) hasta la ruptura de la muestra (Figura 2.28).



Figura 2.27 Ubicación de la muestra entre las puntas cónicas.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.28 Resultado de la ruptura en la prensa Humboldt.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2.29 Resultado de la fuerza ejercida en kN.
Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la ruptura de las 30 muestras de 5x5x5 cm la prensa Humboldt acoplada a las puntas cónicas, se obtuvo las respectivas fuerzas de cada muestra presentadas en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9 Dimensiones de las muestras con sus respectivas fuerzas.

ÍNDICE DE POINT LOAD TEST									
#Muestras	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	FUERZA (kN)	#Muestras	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	FUERZA (kN)
1	4.9	5.13	4.89	23	16	4.89	5	5	29
2	4.9	4.9	4.85	28	17	4.9	5	4.85	13
3	4.91	5	5	28	18	4.89	5.05	4.89	26
4	4.9	5	4.8	22	19	4.92	5.02	4.88	27
5	4.85	5.02	4.85	23	20	4.91	4.91	4.83	26
6	5	5	4.9	28	21	4.95	5	4.98	29
7	4.9	5	4.89	26	22	4.9	5.1	4.85	29
8	4.9	5.1	4.85	27	23	4.95	5.08	4.75	27
9	5	5	4.95	30	24	4.92	4.95	4.85	26
10	4.9	4.95	4.91	26	25	5	5.02	4.95	28
11	4.91	4.95	4.8	27	26	4.9	4.9	4.85	30
12	4.9	5.05	4.9	26	27	4.95	5	4.89	23
13	4.9	5	4.88	27	28	4.95	5.1	4.9	13
14	4.88	5	4.85	27	29	4.95	5.02	4.89	31
15	4.9	5	4.9	18	30	4.92	4.98	4.89	28

Fuente: Elaboración Propia.

2.4.3 Formulas del ensayo del Índice de Point Load Test

A continuación, se detallará las fórmulas utilizadas para la obtención de Índice de Point Load Test (Is50), tomando en cuenta las fuerzas obtenidas en la prensa Humboldt. A manera de ejemplo de este cálculo se considerará el análisis de la muestra número 10 la cual cumple con la relación $\left(\frac{Y}{X} = \frac{D}{L}\right) = 1$ a 1.4 como se había mencionado anteriormente.

Luego se realizó el cálculo del De^2 de cada una de las muestras con la siguiente fórmula:

$$De^2 = \frac{4 \times \text{Área}}{\pi} \quad (24)$$

Donde:

De^2 : Diámetro equivalente.

Además, se realizó los cálculos del I_S en todas las muestras ocupando la siguiente fórmula:

$$I_S = \frac{P}{De^2 \times 10.2 \times 9.81} \quad (25)$$

Donde:

P: es la fuerza necesaria para romper la muestra.

De^2 : es el diámetro equivalente de la muestra.

Finalmente se realizó el cálculo del $I_{S(50)}$ de las muestras utilizando la siguiente fórmula:

$$I_{S(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \times I_S \quad (26)$$

2.4.4 Aplicación de las fórmulas con datos de la muestra #10

Determinación del diámetro equivalente:

Datos:

Área = 24.3045 cm^2

$$De^2 = \frac{4 \times 24.3045 cm^2}{\pi}$$

$$De^2 = 30.9$$

Cálculos del I_s :

$$P = 26\text{KN}$$

$$I_s = \frac{26}{30.9 \times 10.2 \times 9.81}$$

$$I_s = 8.4$$

Cálculos del $I_{S(50)}$:

$$D=4.95\text{cm}$$

$$I_{S(50)} = \left(\frac{4.95}{50}\right)^{0.45} \times 8.4$$

$$I_{S(50)} = 3.0$$

A continuación, se puede observar los datos obtenidos mediante el software Excel, para la obtención del Índice de Point Load Test.

Tabla 2.10 Determinación del Índice de Point Load Test de la muestra #10.

#Muestra	X (cm)	Y (cm)	Y/X	Z (cm)	FUERZA (kN)	De^2	I_s (MPa)	$I_{S(50)}$ (MPa)
10	4.9	4.95	1.01	4.91	26	30.9	8.4	3.0

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se dará a conocer los resultados obtenidos de los ensayos de cada procedo detallado anteriormente, para llegar a la caracterización del material rocoso mediante granulometría e índice de carga puntual.

Pada dichos ensayos, se utilizaron equipos estándar, que son:

- Trituradora de mandíbulas R22.
- Tamices.
- Prensa Humboldt.

Las muestras de dicha formación fueron cortadas de manera adecuada en forma de un paralelepípedo y sus dimensiones finales fueron basadas en diferentes parámetros técnicos que se detallara en el presente capitulo.

Para dichos ensayos se trabajó con 60 muestras, las cuales se obtuvieron en la zona del Cojitambo.

3.1 Análisis de resultados de curvas granulométricas

Principalmente en el análisis de este ensayo, se realizó procesos de trituración de cada muestra, utilizando una trituradora de mandíbulas R22. Una vez trituradas las muestras se procedió a las pruebas de clasificación granulométrica, utilizando los tamices de: $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, 4, 10, y 16 respectivamente, los cuales fueron utilizados en la tamizadora eléctrica durante el período de 2 minutos.

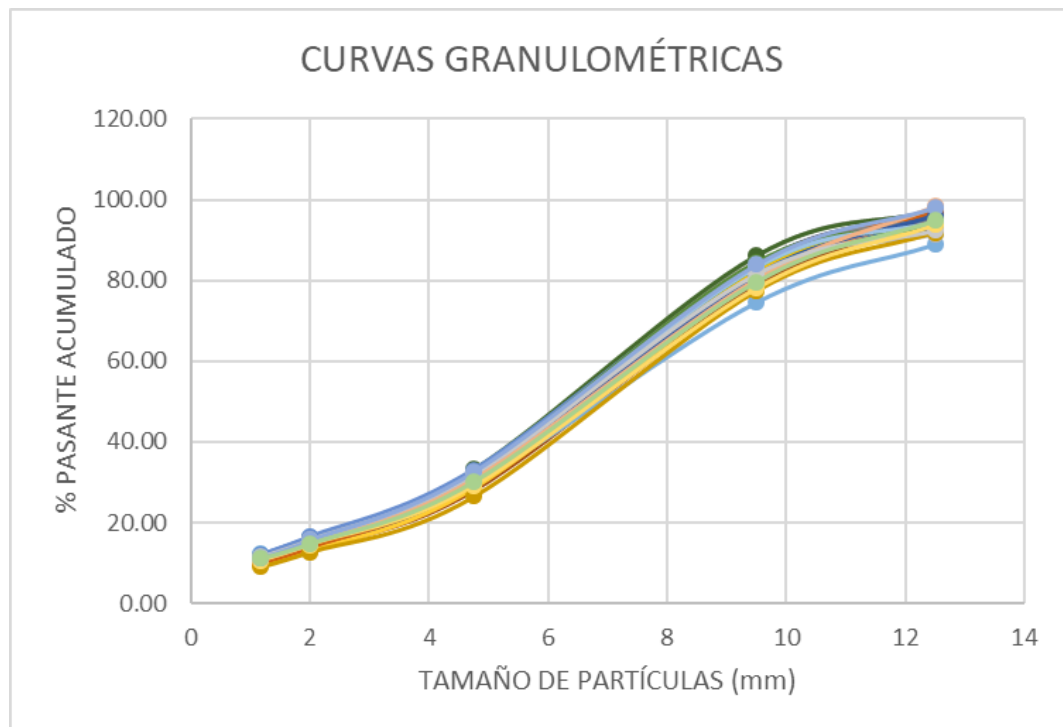
A continuación, se puede observar la clasificación granulométrica de una muestra de las 60 que fueron analizadas en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Resultado de la clasificación granulométrica de la muestra #1.

MUESTRA 1							
PESO (kg)	0.577						
No TAMIZ	MALLA (mm)	PESO TAMIZ (kg)	PESO TAMIZ Y RETENIDO (kg)	PESO PARCIAL (kg)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% PASANTE ACUMULADO
1/2	12.5	0.796	0.832	0.036	6.32	6.32	93.68
3/8	9.5	0.786	0.865	0.079	13.86	20.18	79.82
4	4.75	0.758	1.032	0.274	48.07	68.25	31.75
10	2	0.695	0.782	0.087	15.26	83.51	16.49
16	1.18	0.63	0.654	0.024	4.21	87.72	12.28
FONDO		0.489	0.559	0.07	12.28	100.00	0.00
TOTAL				0.57	100.00		

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura se puede observar la representación gráfica de la distribución de las partículas provenientes del Cojitambo, representadas de la siguiente manera: En el eje de las abscisas se representa el tamaño de las partículas (mm), mientras que el eje de las ordenadas se representa el pasante acumulado en porcentaje (%), cuyos datos son generados en cada curva granulométrica.

**Figura 3.1** Curvas granulométricas sector "Cojitambo".

Fuente: Elaboración propia.

La figura 3.1 indica las 30 curvas que corresponden a las muestras analizadas en el proceso de clasificación granulométrica, estas curvas representan a la formación “Cojitambo”, ubicado en la Provincia de Cañar; zona geográfica en donde se realizó esta investigación.

3.2 Análisis de resultados de modelos de distribución para el d80

Modelo de Schumann

Una vez obtenidos los datos en el Excel para la determinación del d80 de cada muestra se utiliza el modelo estadístico de Schumann, como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 3.2 Datos para la graficación del modelo de Schumann.

Schumann	
Y	X
Log F(x)	log (x)
0	4.09691001
0	4.09691001
-0.02331299	3.97772361
-0.09899569	3.67669361
-0.52086579	3.30103
-0.82949297	3.07188201
-0.95273192	2.77815125

Fuente: Elaboración propia.

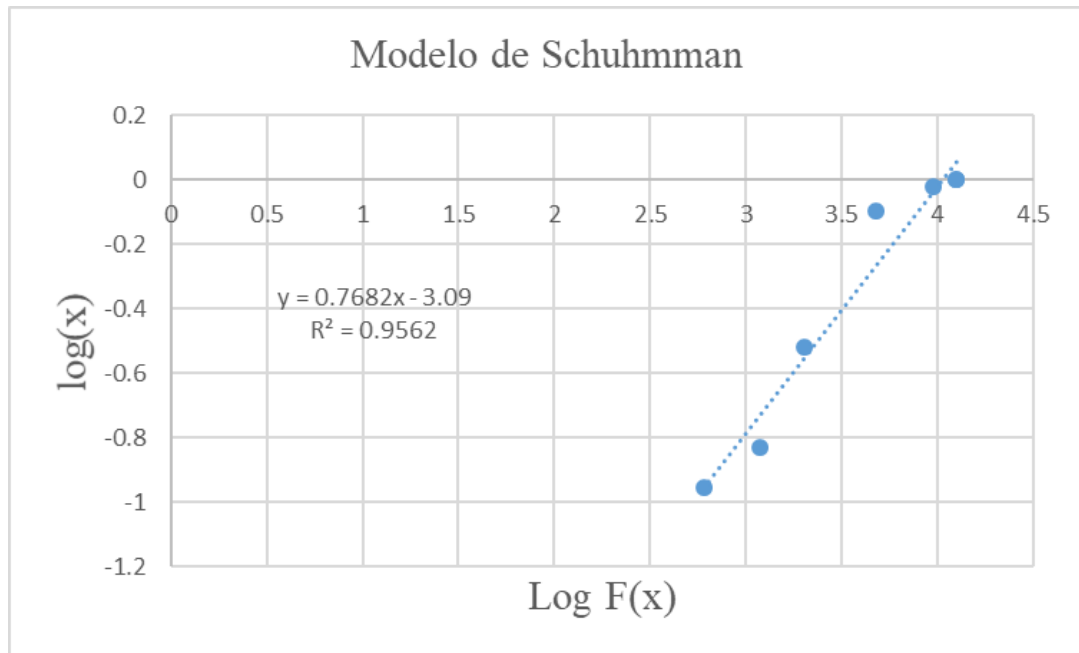


Figura 3.2 Modelo de Schumann.

Fuente: Elaboración Propia.

De este acercamiento se obtiene el valor de n y K_{sch}

$$\mathbf{Log(F(x)) = nLog(x) - n Log(K_{sch})}$$

$$\mathbf{Log(F(x)) = 0.7682Log(x) - 3.09}$$

En donde:

$n = 0.7682$ (Pendiente de la sección lineal).

$n \mathbf{Log(K_{sch})} = 3.09$

$$\mathbf{K_{sch} = 10^{\frac{3.09}{n}} = 10^{\frac{3.09}{0.7682}} = 10529.069 \mu\text{m}}$$

De esta manera se define el modelo de Schumann como:

$$\mathbf{F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}}\right)^n = \left(\frac{x}{10529.069}\right)^{0.7682}}$$

En la siguiente tabla se presentará el d80 obtenido de las 30 muestras.

Tabla 3.3 Resultado del d80 de las 30 muestras mediante el modelo de Schumann.

DETERMINACIÓN DEL d80 DE CADA MUESTRA					
#Muestra	d80	#Muestra	d80	#Muestra	d80
1	7.806	11	7.659	21	7.732
2	7.671	12	7.549	22	8.141
3	7.677	13	8.126	23	7.794
4	7.815	14	7.79	24	7.735
5	7.872	15	7.922	25	7.766
6	7.735	16	7.963	26	7.757
7	7.875	17	7.638	27	7.809
8	8.019	18	7.76	28	7.964
9	7.953	19	7.74	29	7.608
10	7.672	20	7.765	30	7.875

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Análisis de resultados del Índice de Point Load Test

Para la ejecución del Índice de Point Load Test, se utilizaron 30 muestras de 5x5x5 cm aproximadamente que fueron utilizadas para ruptura con las puntas cónicas en la maquina Humboldt, estas muestras cumplieron con la relación de $\left(\frac{y}{x} = \frac{D}{L}\right) = 1$ a 1.4.

Luego de eso se realizó el cálculo del De^2 de cada muestra utilizando la siguiente formula:

$$De^2 = \frac{4 \times \text{Área}}{\pi} \quad (24)$$

Además, se realizaron los cálculos del I_s de cada una de las muestras mediante la siguiente formula:

$$I_s = \frac{P}{De^2 \times 10.2 \times 9.81 \frac{m}{s^2}} \quad (25)$$

Donde:

P = Es la fuerza necesaria para romper la muestra.

De^2 = Es el diámetro equivalente de la muestra.

Finalmente se realizaron los cálculos del $I_{s(50)}$ de las 30 muestras utilizando la siguiente formula:

$$I_{s(50)} = \left(\frac{D}{50}\right)^{0.45} \times I_s \quad (26)$$

Una vez obtenido los cálculos necesarios que se muestran en la tabla 3.4. Se obtienen los valores necesarios para proponer la caracterización del macizo rocos.

Tabla 3.4 Resultados de $I_{s(50)}$ de las 30 muestras.

#Muestras	X (cm)	Y (cm)	Y/X	Z (cm)	FUERZA (kN)	De	Is(MPa)	Is(50)(MPa)
1	4.9	5.13	1.05	4.89	23	31.9	7.2	2.6
2	4.9	4.9	1.00	4.85	28	30.3	9.3	3.3
3	4.91	5	1.02	5	28	31.8	8.8	3.1
4	4.9	5	1.02	4.8	22	30.6	7.2	2.6
5	4.85	5.02	1.04	4.85	23	31.0	7.4	2.6
6	5	5	1.00	4.9	28	31.2	9.0	3.2
7	4.9	5	1.02	4.89	26	31.1	8.4	3.0
8	4.9	5.1	1.04	4.85	27	31.5	8.6	3.1
9	5	5	1.00	4.95	30	31.5	9.5	3.4
10	4.9	4.95	1.01	4.91	26	30.9	8.4	3.0
11	4.91	4.95	1.01	4.8	27	30.3	8.9	3.2
12	4.9	5.05	1.03	4.9	26	31.5	8.3	2.9
13	4.9	5	1.02	4.88	27	31.1	8.7	3.1
14	4.88	5	1.02	4.85	27	30.9	8.7	3.1
15	4.9	5	1.02	4.9	18	31.2	5.8	2.0
16	4.89	5	1.02	5	29	31.8	9.1	3.2
17	4.9	5	1.02	4.85	13	30.9	4.2	1.5
18	4.89	5.05	1.03	4.89	26	31.4	8.3	2.9
19	4.92	5.02	1.02	4.88	27	31.2	8.7	3.1

20	4.91	4.91	1.0 0	4.83	26	30.2	8.6	3.0
21	4.95	5	1.0 1	4.98	29	31.7	9.2	3.2
22	4.9	5.1	1.0 4	4.85	29	31.5	9.2	3.3
23	4.95	5.08	1.0 3	4.75	27	30.7	8.8	3.1
24	4.92	4.95	1.0 1	4.85	26	30.6	8.5	3.0
25	5	5.02	1.0 0	4.95	28	31.6	8.9	3.1
26	4.9	4.9	1.0 0	4.85	30	30.3	9.9	3.5
27	4.95	5	1.0 1	4.89	23	31.1	7.4	2.6
28	4.95	5.1	1.0 3	4.9	13	31.8	4.1	1.5
29	4.95	5.02	1.0 1	4.89	31	31.3	9.9	3.5
30	4.92	4.98	1.0 1	4.89	28	31.0	9.0	3.2

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Correlación del material rocoso

Para determinar la correlación del material rocoso entre la clasificación granulométrica y el Índice de Point Load Test, no basaremos en los datos de la tabla 3.5, cabe recalcar que en esta tabla el d_{80} está ordenado de menor a mayor y el $Is_{(50)}$ de mayor a menor para poder realizar la gráfica de la correlación, situando el d_{80} en el eje de las abscisas (mm) y el $Is_{(50)}$ en el eje de las ordenadas (MPa) reflejando así la siguiente distribución de puntos que se puede observar en la figura 3.3.

Tabla 3.5 Resultado de los cálculos del d_{80} y el Índice de Point Load Test.

d80	Is(50)
7.549	3.53
7.608	3.49
7.638	3.38
7.659	3.30
7.671	3.25
7.672	3.25
7.677	3.23
7.732	3.20
7.735	3.19
7.735	3.15
7.74	3.15

7.757	3.14
7.76	3.12
7.765	3.10
7.766	3.08
7.79	3.08
7.794	3.07
7.806	3.03
7.809	3.01
7.815	2.97
7.872	2.96
7.875	2.95
7.875	2.94
7.922	2.64
7.953	2.62
7.963	2.59
7.964	2.56
8.019	2.05
8.126	1.49
8.141	1.46

Fuente: Elaboración propia.

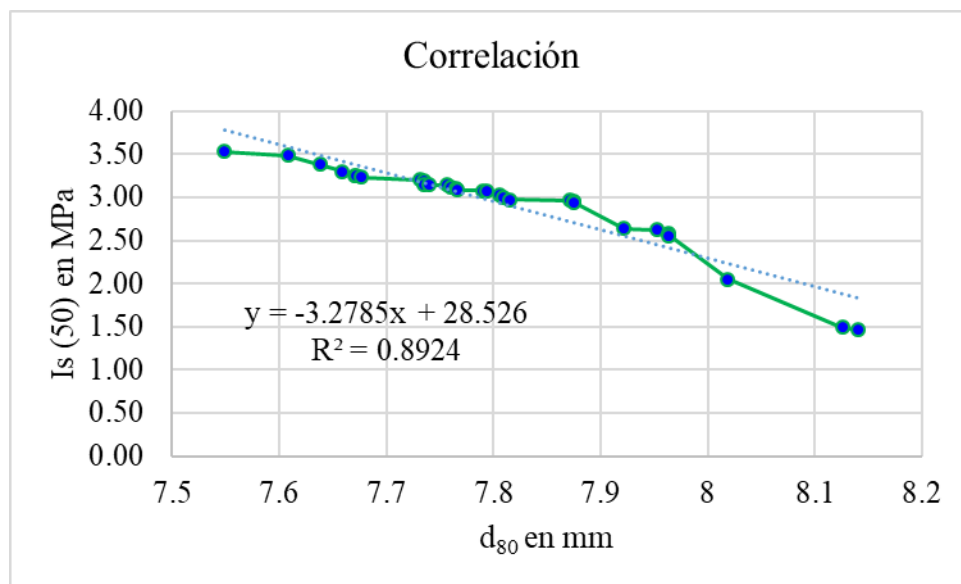


Figura 3.3 Gráfico de correlación entre el d_{80} y $I_s(50)$.

Fuente: Elaboración propia.

La correlación viene dada por el método de mínimos cuadrados, para ello es necesario trazar una recta entre los puntos dados, buscando obtener de esta forma una función continua aproximada de los datos proporcionados, esta función está validada por el R^2 , esta función indica que mientras el valor sea lo más cercano a 1 será mejor la correlación como se observa en la figura 3.3.

Además, se establece que mientras mayor es el d_{80} , el $I_s(50)$ disminuye, la fórmula $Y = -3.2785X + 28.256$ funcionaría ya que el d_{80} está entre los valores de 7.549 y 8.141 en (mm), mientras que el $I_s(50)$ presenta valores entre 3.53 y 1.46 (MPa). Por lo tanto, la fórmula quedará establecida de la siguiente manera:

$$I_{s(50)} = -3.2781d_{80} + 28.256$$

Por lo tanto, la formula ayuda a que el proceso sea eficiente ya que permite ahorrar tiempo y disminuir costos, puesto que, con la correlación obtenida se podría también facilitar el trabajo a los mineros, al poner a disposición la maquinaria adecuada que posee la mina para desarrollar el proceso de trituración, clasificación granulométrica y determinar el d_{80} con mayor facilidad. Con este valor ya se puede utilizar la fórmula de correlación obtenida para determinar el índice de Point Load Test $I_{s(50)}$.

CONCLUSIONES

- Esta investigación presenta una alternativa beneficiosa para el desarrollo de trabajos mineros, en donde se puede obtener la caracterización del material rocoso mediante su resistencia, a través de la correlación entre el d_{80} y el Índice de Point Load Test, sin necesidad de enviar muestras al laboratorio.
- Se deberá seguir el procedimiento planteado, para obtener una adecuada caracterización del macizo rocoso, ya que algún cambio en la presente metodología podría generar otros resultados.
- Como resultado de los ensayos, la roca del Cojitambo tiene un valor del índice de carga puntual entre 1.46 MPa y 3.53 MPa, con esto se puede concluir que el valor de la resistencia a la compresión simple del material rocoso oscila entre 33.6 MPa y 81.2 MPa.
- Se realizó una correlación entre la clasificación granulométrica d_{80} y el Índice de Point Load Test de las muestras establecidas, para comprobar esta relación se puede observar que la ecuación lineal presenta un valor R^2 que está dentro del rango.
- Los equipos utilizados en esta investigación fueron los adecuados y aptos para cada ensayo realizado. Es por ello que se han obtenido resultados favorables que han confirmado nuestra alternativa, como una buena opción para encontrar la resistencia a la compresión simple de la roca.
- Para obtener el $Is_{(50)}$ (Índice de Point Load Test) el cual determina la resistencia a compresión simple de la roca se obtuvo la ecuación $Is_{(50)} = -3.2781d_{80} + 28.256$ que proviene de la correlación de los datos recopilados de las muestras procesadas en la presente investigación en donde el d_{80} es el tamaño nominal de malla que pasa el 80% de partículas. A su vez se obtuvo un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.8924$, este se encuentra dentro del rango de aceptación, lo cual aprueba la correlación establecida.

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar cualquier ensayo se debe verificar que cada probeta cumpla con las condiciones de esbeltez, es decir que cuenten todas con las mismas medidas y también que las mismas se encuentren sanas y no tengan ningún tipo de alteración.
- La metodología se debe cumplir a cabalidad y sin descuidar ningún paso, al momento de medir las probetas, antes y después de cada ensayo. Esto es muy importante para el cálculo de las variables.
- Al realizar las pruebas de I_s es importante que las superficies de las probetas, superior e inferior, estén totalmente paralelas con las placas del equipo, debido a que, al momento de aplicar la fuerza, esta se produce en el área de contacto.
- Es importante indicar que la ecuación planteada es exclusiva para el material rocoso del Cojitambo, pero la metodología utilizada puede generar nuevas ecuaciones para otras zonas de estudio, siempre y cuando se mantenga las condiciones básicas.
- Una mayor precisión a los valores de resistencia a la compresión se puede lograr si se trabaja con mayor cantidad de probetas, en donde el R^2 sea más cercano a 1, esto implica un gasto adicional al proyecto, pero garantiza mejores resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo, J., Calle, A., & Coronel, J. (2016). ACTUALIZACIÓN/ELABORACIÓN DEL PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DE LA PARROQUIA RURAL COJITAMBO. *GOBIERNO AUTÓNOMO DESCENTRALIZADO PARROQUIAL RURAL COJITAMBO*.
- Brady, B., & Brown, E. (2006). *Rock Mechanics and Mining Engineering*. Springer , Netherlands.
- Bustamante, E., & Guillén, C. (2020). Análisis de la granulometría fina y su relación con la resistencia a compresión simple en rocas. *Trabajo de graduación previo a la obtención del título de INGENIERO EN MINAS*. Cuenca, Ecuador.
- Castillo, L., & Jesús, Q. (25 de mayo de 2011). Trituración y Molienda. Venezuela. Diomedes. (agosto de 2015). Chancado-Trituración.
- Escobar, D., & Enrique, C. (2016). ESTRUCTURA DEL SUELO Y GRANULOMETRÍA.
- Eslava, J. L. (25 de agosto de 2015). TRITURACIÓN MECANICA II. *Práctica de Laboratorio N° 3*.
- Gabriels, D., & Lobos, D. (2010). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo .
- Galicia, J. (abril de 2010). Trituración de minerales.
- Galván, M. C. (2015). *Mecánica de Rocas: Correlación entre la Resistencia a Carga Puntual y la Resistencia a Compresión Simple*. Cali, Colombia: Programa Editorial Universidad del Valle.
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Kahraman. (2001). Evaluation of simple methods for assessing the uniaxial compressive strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 981-994.
- Lojano, V., & Pinguil, D. (2019). *PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE MOLIENDACDE LACTOSA EN EMPRESAS LÁCTEAS*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CEDE CUENCA, Cuenca, Azuay, Ecuador.

- Luna, E. (2016). Elaboración de guías prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay. *Trabajo de grado*. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- Peng, S., & Zhang, j. (2007). *Rock properties and mechanical behaviors*. Springer Berlin Heidelberg.
- Ramírez, P., & Monge, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid.
- Ramírez, P., & Monge, L. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*. Madrid.
- Restrepo, I. (2013). Correlación de la resistencia a compresión uniaxial con la humedad y porosidad eficaz en rocas de una cantera del sur occidente colombiano. *Proyecto de grado en Ingeniería Civil*. Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia .
- Rodríguez, P. (2021). *Propuesta de correlación entre el corte de rocas y el índice de point load tests Is(50)*. UNIVERSIDAD DEL AZUAY, CUENCA.
- Roura, M. (abril de 2010). ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO DE LA INESTABILIDAD DEL SUELO QUE AFECTA AL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO COJITAMBO, ESTABILIZACIÓN Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN . *Proyecto de graduación*. Cuenca.
- Sinchi, L. (2014). Diagnóstico territorial de la parroquia Cojitambo del cantón Azogues. *Monografía previa a la obtención del título de licenciada* . Cuenca, Ecuador.
- Vera, J. (05 de junio de 2015). Trituración De Minerales Definición.
- Yepes, V. (16 de marzo de 2016). Propiedades granulométricas de los áridos.