



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

Correlación entre la Resistividad de las Rocas y la Resistencia a la  
Compresión Simple.

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO DE MINAS**

**Autor:**

JHENIFER CRISTINA PADRÓN SUÁREZ

**Director:**

ERNESTO PATRICIO FEJOO CALLE

**CUENCA, ECUADOR**

**2020**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de graduación va dedicado a toda mi familia por haber sido mi apoyo a lo largo de mi carrera universitaria y mi vida.

A mis padres Liliana y Toño quienes siempre me apoyaron a cumplir mis metas y mis sueños, con su amor esfuerzo y dedicación me acompañaron en este camino, sin ustedes nada hubiese sido posible, a mi hermano David quien fue mi compañero y guía durante todo este proceso, a mi abuelita Luz quien con su sabiduría me supo guiar día a día.

Pero sobre todo, este logro se lo dedico a mi hija Anthonela quien con su llegada cambio mi vida y mi manera de ver el mundo, mi pequeña negrita fue el motor que me impulso para cumplir mi sueño, el no poder compartir día a día su desarrollo fue la parte más difícil de esta travesía pero su amor y paciencia me levantaban, porque no hay nada que la sonrisa y el abrazo de un hijo no logre solucionar, todo lo que he hecho y hago es por ti y para ti, por eso hoy puedo decir que este triunfo no solo es mío, por el contrario es nuestro mi princesa, siempre serás mi mayor bendición.

## **AGRADECIMIENTO**

En primer lugar quiero expresar mi gratitud con Dios, pues su bendición llena mi vida, y su amor me impulsa a ser mejor ser humano, gracias papito Dios por permitirme alcanzar un peldaño más en mi vida, pues mientras camine de tu mano y me cubras con tu manto sé que siempre estaré bendecida.

A mis padres, solo puedo decirles gracias por haberme apoyado y motivado a cumplir ese sueño, dicen que la mejor herencia que un padre les deja a sus hijos es la educación, pero ustedes me enseñaron que la mejor herencia que puedo recibir es el amor y apoyo incondicional que siempre están dispuestos a dar; como no agradecerles a mi madre, mi tía Carmina y mi abuelita por haber cobijado y cuidado de mi negrita para que yo pueda culminar mis estudios, todo se los debo a ustedes.

Mi profundo agradecimiento a cada uno de mis profesores por haber impartidos sus conocimientos día a día, mismos que me servirán para crecer profesionalmente, de manera especial quiero expresar mi más grande agradecimiento al Ing. Patricio Feijoo, quien me brindó todo el apoyo para la realización de mi trabajo de grado, pero sobre todo por haber sido un amigo más durante este proceso de aprendizaje, muchas gracias por todo el apoyo brindado.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 Fundamentos eléctricos.....	3
1.1.1 Carga eléctrica.....	3
1.1.2 Campo eléctrico.....	3
1.1.3 Corriente eléctrica.....	4
1.1.4 Diferencia de potencial.....	4
1.1.5 Intensidad.....	4
1.1.6 Ley de Ohm.....	4
1.1.7 Resistividad eléctrica $\rho$ .....	5
1.1.8 Conductividad (O).....	6
1.2 Propiedades físicas de las rocas.....	6
1.2.1 Porosidad.....	6
1.2.2 Permeabilidad.....	9
1.2.3 Capilaridad.....	15
1.2.4 Saturación del agua.....	16
1.2.5 Absorción y adsorción.....	17
1.3 Resistividad de las rocas.....	18
1.3.1 Efecto de la edad geológica en la resistividad eléctrica.....	20
1.3.2 Factores que afectan la resistividad.....	21
1.4 Efectos del agua en la resistividad eléctrica.....	23
1.5 Resistencia a la compresión simple.....	24
CAPÍTULO II.....	30
EXPERIMENTACIÓN.....	30
2.1 Descripción de las muestras.....	31

2.2	Preparación de las muestras .....	33
2.3	Determinación de la resistividad.....	37
2.4	Determinación de la Resistencia a la compresión simple.....	42
CAPÍTULO III .....		44
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		44
3.1	Análisis de resistividades .....	44
3.2	Análisis de la resistencia a la compresión simple.....	49
3.3	Propuesta de correlación .....	50
3.4	Interpretación y análisis de resultados obtenidos .....	53
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		55
CONCLUSIONES.....		55
RECOMENDACIONES .....		56
BIBLIOGRAFÍA .....		57

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Electrodo puntual de emisión de corriente continua .....	3
Figura 1.2 Probeta para medición de resistividad eléctrica .....	5
Figura 1.3 Porosidad Primaria-Secundaria .....	8
Figura 1.4 Porosidad según la conexión .....	9
Figura 1.5 Esquema Ley de Darcy .....	10
Figura 1.6 Influencia de la porosidad de tamaño de poro en la permeabilidad .....	11
Figura 1.7 Logaritmo de permeabilidades en rocas y sedimentos .....	12
Figura 1.8 Coeficiente de permeabilidad en rocas .....	13
Figura 1.9 Permeabilidad absoluta .....	13
Figura 1.10 Permeabilidad efectiva .....	14
Figura 1.11 Permeabilidad efectiva .....	14
Figura 1.12 Variación en el ángulo de contacto sólido-líquido .....	16
Figura 1.13 Saturación del agua en rocas .....	16
Figura 1.14 Adsorción de moléculas agua por partículas hidrófilas durante ciclos de mojado y secado .....	18
Figura 1.15 Ábaco Gen-8 Schlumberger .....	22
Figura 1.16 Resistividad de una solución ClNa en función de su concentración .....	24
Figura 1.17 Prueba de compresión simple .....	25
Figura 1.18 Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión. ....	26
Figura 1.19 Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico. ....	27
Figura 2.1 Mapa de Ubicación de las zonas de estudio .....	30
Figura 2.2 Mapa geológico- Cojitambo .....	31
Figura 2.3 Mapa geológico - Pumayunga .....	32
Figura 2.4 Tamaño de las probetas .....	33
Figura 2.5 Probetas reales grandes- Cojitambo .....	34
Figura 2.6 Probetas reales pequeñas Cojitambo .....	34
Figura 2.7 Probetas grandes- Pumayunga .....	34

Figura 2.8 Probetas pequeñas- Pumayunga.....	35
Figura 2.9 Muestras en agua- Cojitambo .....	37
Figura 2.10 Multímetro de medición eléctrica .....	38
Figura 2.11 Medición de la resistividad en las aristas.....	38
Figura 2.12 Medición de la resistencia eléctrica- Cojitambo .....	39
Figura 2.13 Muestras en agua- Pumayunga.....	40
Figura 2.14 Medición de la resistencia eléctrica- Pumayunga .....	41
Figura 2.15 Muestra en la máquina de Humboldt .....	43
Figura 2.16 Muestra sometida a una fuerza de rotura .....	43
Figura 3.1 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas grandes- Cojitambo .....	50
Figura 3.2 Correlación RCU Máxima y Mínima, probetas grandes- Cojitambo .....	51
Figura 3.3 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas pequeñas – Cojitambo .....	51
Figura 3.4 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas grandes- Pumayunga .....	52
Figura 3.5 Correlación RCU Máxima y Mínima, probetas grandes- Pumayunga .....	52
Figura 3.6 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas pequeñas - Pumayunga.....	53

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Resistividad de las rocas y minerales .....	18
Tabla 1.2 Resistividad en función de la edad geológica en $\Omega\text{m}$ .....	20
Tabla 1.3 Márgenes de variación de la resistividad de las aguas .....	23
Tabla 1.4 Dureza de las rocas frente al martillo geológico .....	28
Tabla 1.5 Clasificación ingenieril de las rocas .....	28
Tabla 1.6 Clasificación de las rocas según la R.C.U .....	29
Tabla 2.1 Tamaño de las muestras grandes Cojitambo .....	35
Tabla 2.2 Tamaño de las muestras pequeñas- Cojitambo .....	35
Tabla 2.3 Tamaño de las muestras grandes – Pumayunga .....	36
Tabla 2.4 Tamaño de las muestras pequeñas-Pumayunga .....	36
Tabla 2.5 Resistencias eléctricas probetas grandes- Cojitambo .....	39
Tabla 2.6 Resistencias eléctricas probetas pequeñas- Cojitambo.....	40
Tabla 2.7 Resistencias eléctricas probetas grandes- Pumayunga .....	41
Tabla 2.8 Resistencias eléctricas probetas pequeñas- Pumayunga.....	42
Tabla 3.1 Resistividades eléctricas de las probetas grandes- Cojitambo .....	44
Tabla 3.2 Resistividades eléctricas probetas pequeñas- Cojitambo .....	45
Tabla 3.3 Resistividades eléctricas probetas grandes- Pumayunga.....	47
Tabla 3.4 Resistividades eléctricas probetas pequeñas- Pumayunga .....	48
Tabla 3.5 Valores de la resistencia a la compresión.....	49

## **CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE.**

### **RESUMEN**

En minería la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial es un parámetro fundamental para la explotación de los macizos rocosos, cuyo valor se lo obtiene mediante experimentación en laboratorio.

El presente trabajo que es de carácter investigativo, determinó la posible correlación existente entre la resistividad de las rocas y la resistencia a la compresión uniaxial. Las zonas estudiadas fueron los sectores de Cojitambo en la provincia de Cañar, y Pumayunga en la provincia del Azuay.

La resistividad fue obtenida mediante un multímetro, mientras que para la resistencia a la compresión se utilizó una prensa de Humboldt, ambos ensayos se realizaron en los laboratorios de la Universidad del Azuay. Con los resultados obtenidos, se procedió a elaborar un gráfico que permitió determinar la correlación existente entre las mismas.

**Palabras clave:** Compresión uniaxial, resistividad, conductividad, rocas.

Ernesto Patricio Feijoo Calle

Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Director del Trabajo de Titulación**

**Coordinador de Escuela**

Jhenifer Cristina Padrón Suárez

**Autora**

## **CORRELATION BETWEEN ROCK RESISTIVITY AND SIMPLE COMPRESSION RESISTANCE**

### **ABSTRACT**

In mining, the determination of uniaxial compression resistance is a fundamental parameter to exploit rock massifs, which value is obtained through laboratory experimentation. The present research determined the possible correlation between the rock's resistivity and the resistance to uniaxial compression. The areas studied were Cojitambo, located in Cañar province and Pumayunga, located in Azuay. The resistivity was obtained by a multimeter, while for the resistance to the compression was measured by a Humboldt press. Both tests were developed in the laboratories of Universidad del Azuay. With the results obtained, graphics were elaborated to determine the correlation between the research variables.

**Key words:** Uniaxial compression, resistivity, conductivity, rocks.

Ernesto Patricio Feijoo Calle

**Thesis Director**

Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Faculty Coordinator**

Jhenifer Cristina Padrón Suárez

**Author**



Translated by



Jhenifer Padrón

Padrón Suárez Jhenifer Cristina

Trabajo de Titulación

Ing. Patricio Feijoo Calle

Mayo, 2020

## **CORRELACIÓN ENTRE LA RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE**

### **INTRODUCCIÓN**

La minería es una de las actividades más antiguas que viene desarrollando el hombre, hoy en día se la considera como una actividad económica, ya que la misma está compuesta por la explotación y extracción de minerales que se han ido acumulando en el suelo y subsuelo. Para la extracción del mineral ya sea minería a cielo abierto o subterráneo se requiere de varias fases, las mismas que permiten explorar, extraer, procesar, transportar y aprovechar el cuerpo mineral.

Las rocas poseen características mecánicas que permiten analizar la estabilidad de los macizos rocosos, donde el cálculo de la resistencia a la compresión es un índice fundamental en lo referente a la estabilidad. La resistencia es el esfuerzo máximo que soportan los macizos rocosos por unidad de área a la que el material falla por fracturación o cizalla, su estimación se la puede realizar en el campo o en laboratorios, desde una determinación subjetiva hasta una medición indirecta.

Por otra parte, las rocas se clasifican de distintas maneras según la fuerza de compresión que estas soportan, para determinar este proceso es necesario enviar las muestras a laboratorios que poseen equipos para la determinación de esfuerzos, ya que las minas no cuentan con los equipos necesarios para su determinación.

Se han establecido mediante múltiples ensayos y análisis de núcleos de rocas una correlación con distintos parámetros que permiten obtener valores de resistencia a la compresión simple para formaciones específicas de la masa.

La resistividad de las rocas es el impedimento al paso de corriente eléctrica que estas poseen y es propia de cada material. El principal medio de control de este parámetro es

la porosidad, pues a medida que esta disminuye, la resistividad de las rocas aumenta, su determinación es sencilla, ya que se puede utilizar cualquier equipo de medición eléctrica.

Por otro lado, una de las dificultades que se presentan dentro de las minas es la de no contar con equipos necesarios para la determinación de las resistencias de las rocas, por lo que se las tiene que enviar a laboratorio, mientras que el cálculo de resistividades como se mencionó anteriormente se lo puede hacer en el campo de manera directa usando cualquier equipo de medición eléctrica. Por lo tanto, se propone la experimentación de probetas de roca para obtener su resistividad y resistencia, así se determinará la relación existente entre estas dos variables, el análisis de resultados es fundamental para encontrar su correlación.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

### 1.1 Fundamentos eléctricos

La electricidad no es más que una forma de energía presente en las actividades que desarrollamos a diario, esta se produce de diversas maneras, para su mayor comprensión se describen los siguientes conceptos:

#### 1.1.1 Carga eléctrica

(Fernández & Coronado, s.f.) definen a la carga eléctrica como una propiedad que poseen las partículas subatómicas, estas pueden ser positivas o negativas y generan un campo eléctrico a su alrededor. Las cargas que poseen un mismo signo se repelen mientras que las de signo contrario se atraen.

#### 1.1.2 Campo eléctrico

La capacidad de atracción repulsión que poseen dos cargas eléctricas que son colocadas dentro de una zona altera las propiedades de la misma, (Solana, 2014) afirma que así se genera un campo eléctrico a su alrededor.

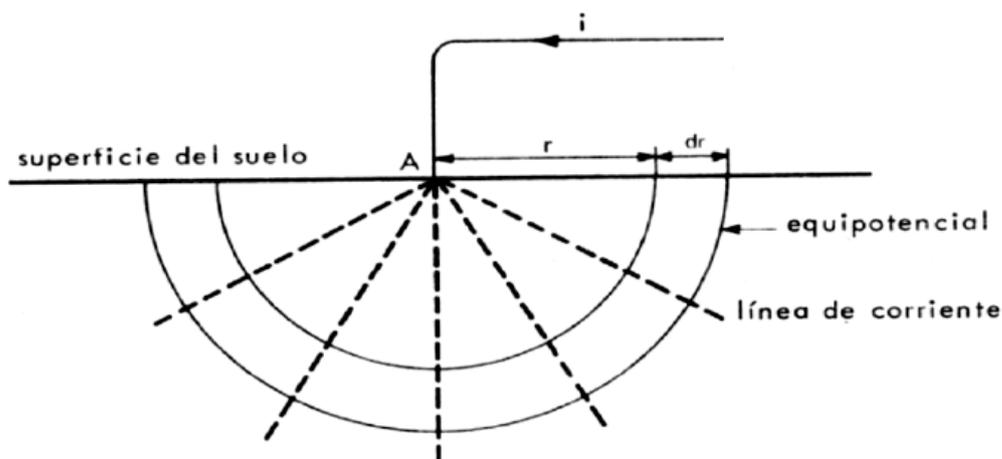


Figura 1.1 Electrodo puntual de emisión de corriente continua  
Fuente: (Solana, 2014)

### 1.1.3 Corriente eléctrica

La corriente eléctrica según (Velasco, 2013) hace referencia a las cargas que se desplazan por un conductor debido a la diferencia de potencial, y se aplica en los extremos del mismo.

### 1.1.4 Diferencia de potencial

La diferencia de potencial es el trabajo realizado por una carga al desplazarse desde un punto hacia otro, se mide en voltios.

### 1.1.5 Intensidad

El flujo eléctrico o intensidad es la cantidad de carga eléctrica que se mueve dentro de un campo eléctrico en un tiempo determinado, su unidad es el amperio, es decir un columbio por segundo.

$$I = \frac{Q}{t} \quad (1)$$

Donde:

**I**= Intensidad (A)

**Q**= Carga Eléctrica (c)

**t**= Tiempo (s)

### 1.1.6 Ley de Ohm

Su nombre se debe al físico matemático Georg Simon Ohm, quien establece una relación directamente proporcional entre el voltaje existente en los extremos de un elemento y la intensidad eléctrica que circula por el mismo, los autores (Barrera & Rugel, 2016) indican que esta relación representa la resistencia eléctrica, misma que viene siendo indirectamente proporcional a la intensidad.

$$R = \frac{V}{I} \quad I = \frac{V}{R} \quad V = I * R \quad (2)$$

Donde:

**I**= Intensidad (A)

**R**= Resistencia ( $\Omega$ )

**V**= Voltaje (V)

La resistencia eléctrica puede definirse también como la oposición del paso de corriente debido a la dificultad de las cargas para desplazarse, se calcula con las fórmulas establecidas por la ley de Ohm y su unidad es el ohmio ( $\Omega$ ); otra manera de calcularla es en base a la naturaleza del conductor, es decir según la resistividad del material. (Auge, 2008) determina que en el caso de prospección geoelectrica se toma en cuenta la resistividad de las rocas o sedimentos.

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (3)$$

$\rho$ = Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )

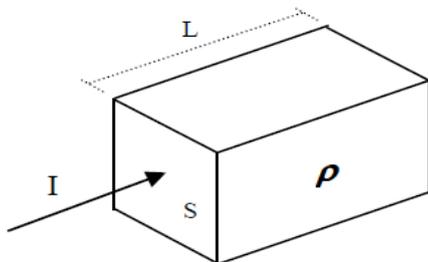
L= Longitud (m)

S= Sección ( $\text{cm}^2$ )

R= Resistencia ( $\Omega$ )

### 1.1.7 Resistividad eléctrica $\rho$

Para (Estrada, 2015) la resistividad eléctrica es el impedimento de paso de corriente por un determinado material, esta depende tanto de la naturaleza como de la estructura física del mismo. Se mide en las caras contrarias de un cubo y su unidad es el ohmio por metro ( $\Omega\text{m}$ .)



$$\rho = \frac{RL}{s} = \Omega\text{m} \quad (4)$$

Figura 1.1 Probeta para medición de resistividad eléctrica

Donde

R= Resistencia ( $\Omega$ )

L= Longitud (m)

s = Sección ( $\text{cm}^2$ )

### 1.1.8 Conductividad ( $\sigma$ )

La conductividad es todo lo contrario a la resistividad, ya que esta facilita el paso de corriente dependiendo el material. Los metales son excelentes conductores de electricidad, la unidad en la que se expresa la conductividad son los siemens.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

$\sigma$  = Conductividad (S)

$\rho$  = Resistividad ( $\Omega\text{m}$ )

## 1.2 Propiedades físicas de las rocas

(Benavente, Bernabéu, & Cañaveras, 2008) explican que las rocas presentan diversas propiedades que varían de acuerdo al tipo de roca y según sus características petrográficas como forma, tamaño, morfología, volumen de poros, entre otras. Mientras que para (Benavente, 2006) las propiedades físicas de las rocas son de gran importancia para definir la durabilidad de las mismas, siendo la porosidad uno de los factores más influyentes, puesto que condiciona la movilidad del agua dentro del interior de la roca.

### 1.2.1 Porosidad

La mayoría de las rocas son cuerpos porosos, que se forman en fases sólidas en las cuales los espacios vacíos son ocupados por fluidos. La porosidad por ende se considera como el conjunto de espacios vacíos en una roca, y se contempla bajo dos puntos de vista:

- Como componente petrográfico.
- Como propiedad física.

#### **Porosidad como componente petrográfico**

Desde el punto de vista petrográfico se analiza el proceso de formación de los espacios vacíos y el volumen total del macizo rocoso, donde su diferencia está en la continuidad de estos espacios que se conoce como sistema poroso, mismo que tiene una configuración tridimensional difícil de cuantificar. Los elementos que lo caracterizan según (Alonso, 2013) son la forma, tamaño, orientación y homogeneidad de las rocas que favorecen a la textura de estas.

### Porosidad como propiedad física de la roca

La porosidad se define como la relación existente entre el volumen total de poros y el volumen total de la roca, es decir, la capacidad de almacenamiento de un fluido que posee la misma. Generalmente se expresa en porcentaje y se calcula mediante la siguiente fórmula (Alonso, 2013):

$$\Phi = \frac{\text{Volumen de vacíos (m}^3\text{)}}{\text{Volumen Total (m}^3\text{)}} * 100 \quad (6)$$

Según (Archie, 1952) se considera los siguientes valores de porosidad:

- Muy baja: menor al 4%
- Baja: de 4 a 8%
- Media de 8 a 16%
- Alta de 16 a 32%
- Muy alta: mayor al 32%

### Complejidad del sistema poroso

Es de gran importancia conocer las características del sistema poroso y de los espacios vacíos, para lograrlo se utilizarán los medios fisurados y porosos.

**Medios fisurados:** La porosidad se ocasiona debido a las discontinuidades presentes en las rocas por la presencia de fisuras, mismas que son de gran importancia en la mecánica de rocas. (Alonso, 2013) manifiesta que su estudio es complejo, debido a que depende de la preparación de las muestras o del estado tensional del macizo y considera como elevados valores superiores al 1%.

**Medios porosos:** (Alonso, 2013) expone que su estudio es complejo debido a que se debe efectuar un análisis de los poros que hacen que la porosidad tenga un incremento elevado, la capacidad de almacenamiento de fluidos y los accesos a los poros indican la capacidad de transporte de los fluidos.

Para el análisis del sistema poroso se tiene en cuenta los siguientes elementos:

- Relación tamaño de poro/tamaño de acceso
- Homogeneidad de la roca

- Isotropía de la roca
- Selectividad de la roca

### Clasificación de la porosidad

#### Según su origen

**Primaria:** Se produce cuando el material es depositado en el momento de la formación de la roca.

**Secundaria:** Se da posterior a la deposición de los sedimentos que dieron origen a la roca mediante procesos naturales o artificiales; para (Da Silva, 2012) algunos de los procesos que dan paso a la porosidad secundaria son la disolución y fracturación.

- **Disolución:** La disolución es definida por (Da Silva, 2012) como la producción mediante reacciones químicas que saturan el medio poroso y la matriz de la roca, modificando por lo tanto el volumen del sistema.
- **Fracturación:** (Da Silva, 2012) asevera que esta es otra de las causas de la porosidad secundaria, pues luego de la deposición de los sedimentos la roca sufre deformaciones por actividades tectónicas, mismas que producen fisuras causando de esta manera un aumento en la porosidad de las rocas.

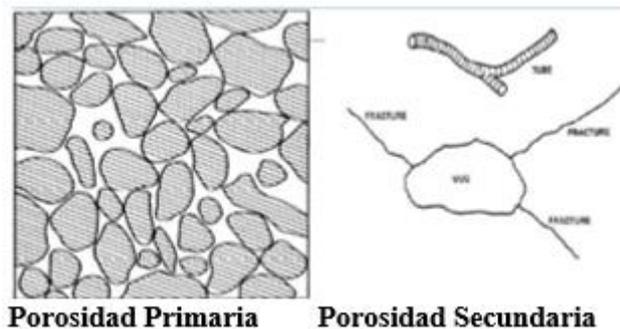


Figura 1.3 Porosidad Primaria-Secundaria  
Fuente: (Da Silva, 2012)

#### Según la comunicación de sus poros

El material con el que cementa las rocas determina como los poros se entrelazan entre sí o se apartan, clasificando a la porosidad en:

- **Interconectada o efectiva:** Representa el volumen de los espacios que contienen fluido y se encuentran interconectados entre sí, en proporción al volumen total. (Alonso, 2013) enfatiza que la porosidad efectiva es de mayor importancia debido a que indica la capacidad de almacenamiento de fluidos, entre otras propiedades físicas como lo son la durabilidad y calidad. Los valores van desde el 1% en rocas cristalinas hasta el 15% en rocas detríticas.
- **No interconecta o no efectiva:** Representa el volumen de los espacios que contienen fluido, pero no se encuentran interconectados entre sí, en proporción al volumen total.
- **Total:** Representa el máximo valor de la porosidad en un material, es decir el volumen total de vacíos tanto abiertos como cerrados por el volumen total de la roca. (Alonso, 2013) explica que se puede calcular a partir de las densidades de los granos minerales ( $\rho_s$ ) y la densidad de la roca seca ( $\rho_d$ ).

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} * 100 \quad (7)$$

La porosidad total también se define como la sumatoria de la porosidad efectiva y no efectiva.

$$\Phi_{TOTAL} = \Phi_{efectiva} + \Phi_{no\ efectiva} \quad (8)$$

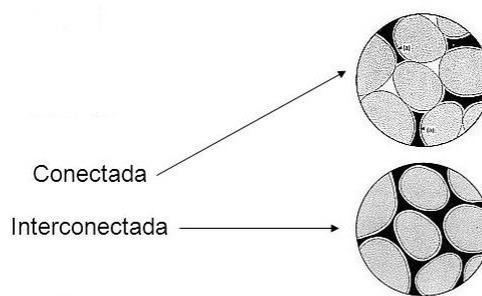


Figura 1.2 Porosidad según la conexión

### 1.2.2 Permeabilidad

La permeabilidad es la capacidad de la roca para transmitir fluidos por medio de sus poros sin alterar su estructura interna, (Benavente, 2006) también establece una relación entre

la velocidad y su gradiente hidráulico. La permeabilidad es medida según el sistema de internación (m<sup>2</sup>), pero la más utilizada es el Darcy (1D= 0.986923 μm).

$$k = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{A \cdot \Delta p} \quad (9)$$

Donde:

**Q** = flujo (cc/s.)

**ΔP** = Delta de presión (atm/cm)

**A** = área (cm<sup>2</sup>)

**μ** = viscosidad (poise)

**L** = longitud (cm)

**k** = permeabilidad

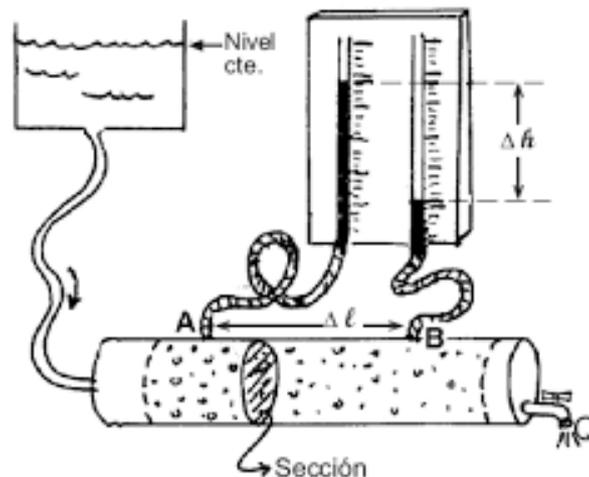


Figura 1.3 Esquema Ley de Darcy  
Fuente: (Benavente, 2006)

Darcy establece ciertas suposiciones con respecto a la permeabilidad que son:

- La permeabilidad de un fluido es constante.
- El fluido satura en su totalidad al medio poroso.
- La velocidad del flujo es laminar.
- La ley de Darcy quedará inválida con la presencia de otros fluidos.

Las propiedades petrográficas y petrofísicas de las rocas juegan un papel importante en la determinación de la permeabilidad, pues la forma, tamaño y distribución de los poros

permiten establecer una correlación entre la permeabilidad y la porosidad, siendo la determinación del volumen total de poros uno de los factores más difíciles de encontrar, esto se debe a que se trata de propiedades dinámicas y estáticas respectivamente, haciendo que esta correlación sea baja. La porosidad según (Benavente, 2006) aumenta en rocas fisuradas dependiendo de la orientación, tamaño y apertura que presentan las fisuras, pero el aumento de esta no significa que la permeabilidad incremente de la misma manera.

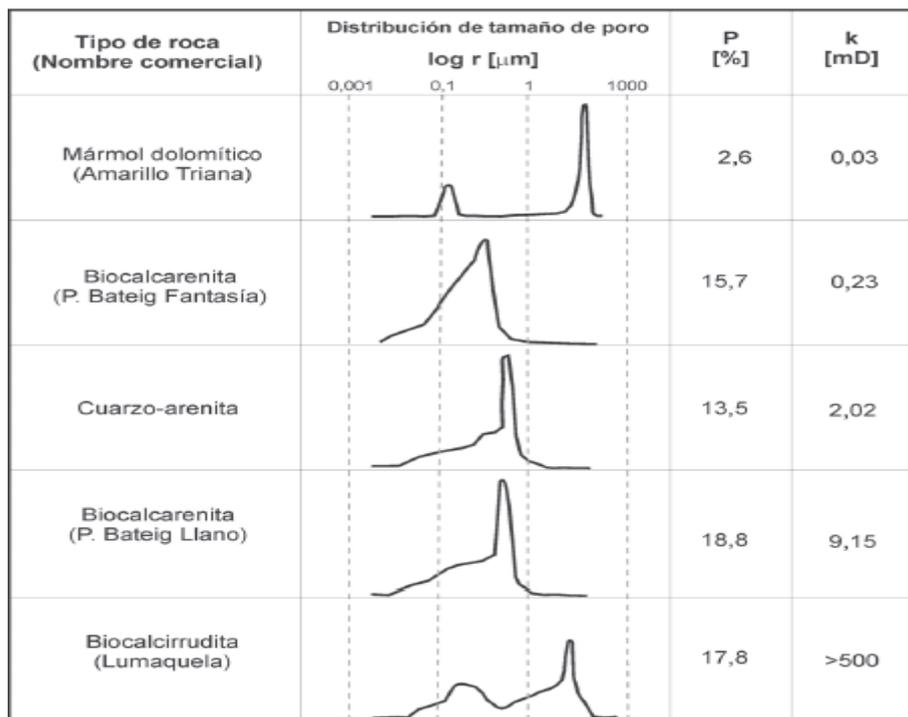


Figura 1.4 Influencia de la porosidad y la distribución de tamaño de poro en la permeabilidad  
Fuente: (Benavente, 2006)

La conductividad eléctrica (K) es otro de los factores que contribuye a determinar el paso de un fluido en un medio saturado, por ende, permite calcular la permeabilidad; es necesario conocer el área o sección sobre la cual se trabaja, puesto que esta nos indica cuál de estas dos aplicaciones es la más idónea.

$$K = \frac{\gamma}{\mu} k = \frac{\rho \cdot g}{\mu} k \quad (10)$$

Donde:

- $\rho$ = Densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
- $g$ = Gravedad o aceleración ( $\text{m/s}^2$ )
- $\gamma$ = Peso específico ( $\text{kg/m}^3$ )

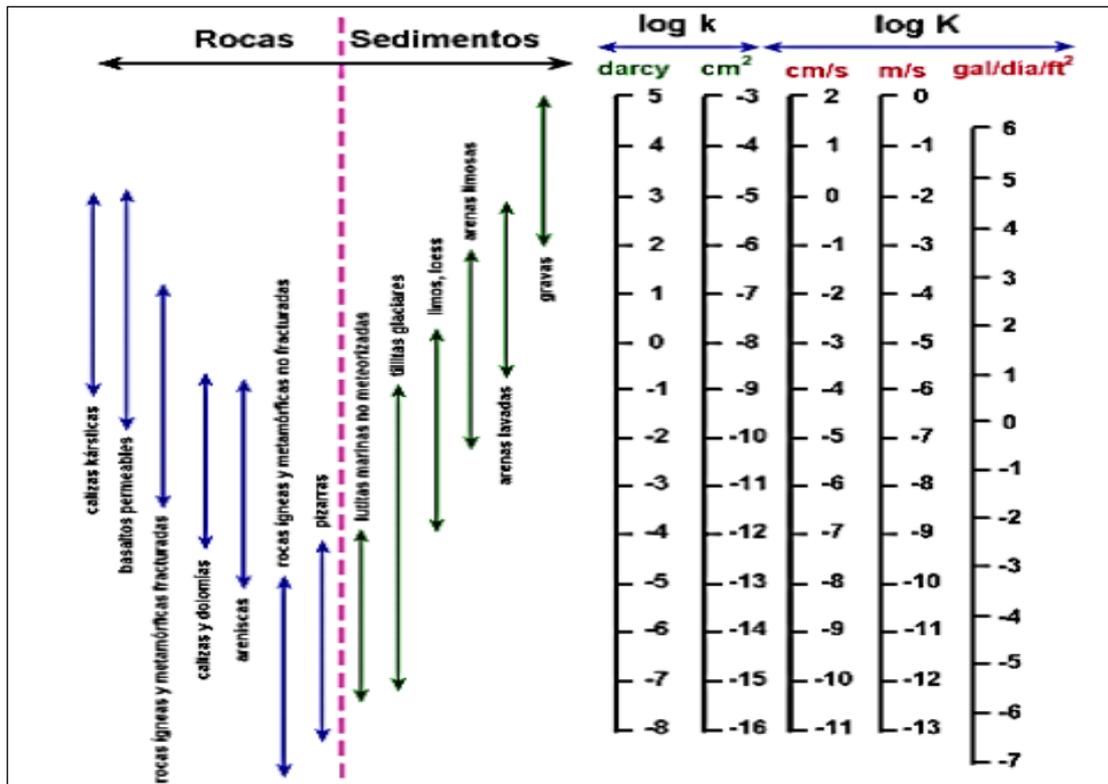


Figura 1.5 Logaritmo de permeabilidades en rocas y sedimentos  
 Fuente: (Abanto & Winter, 2018)

La permeabilidad también se relaciona con la durabilidad de las rocas, en las fisuradas esta relación es inversamente proporcional y en las porosas directa. Cabe recalcar que ciertas rocas porosas presentan valores altos de permeabilidad, lo que las hace más durables, por lo tanto, su cálculo utiliza células triaxiales para el sellamiento de las superficies de las probetas, sobre las cuales se ejercen una presión baja para evitar la formación de microfisuras que alteran los resultados. La permeabilidad en las rocas es baja cuando estas se encuentran intactas, (Benavente, 2006) asegura que esto no sucede en rocas discontinuas, donde el tipo de familia influye en el flujo que por ella transita.

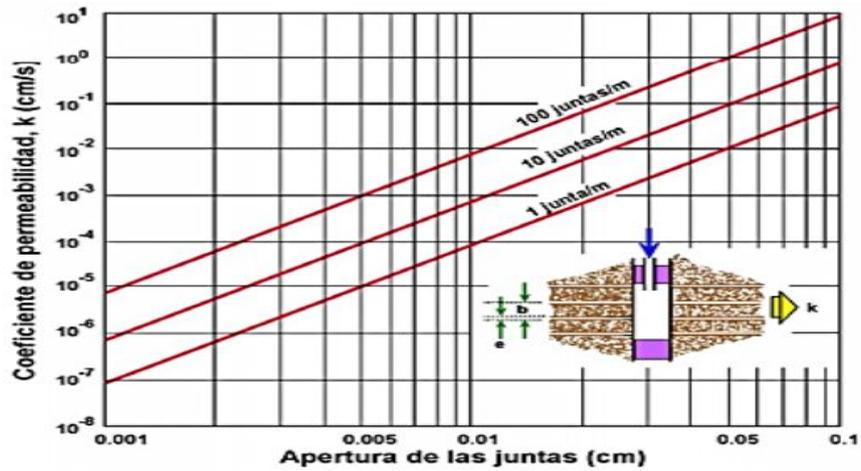


Figura 1.6 Coeficiente de permeabilidad en rocas  
 Fuente: (Abanto & Winter, 2018)  
 La permeabilidad en las rocas puede ser:

- **Permeabilidad absoluta:** Es el movimiento de un fluido por medio de los poros interconectados que presenta una matriz rocas, obteniendo la saturación el 100%, siempre que el fluido sea homogéneo.

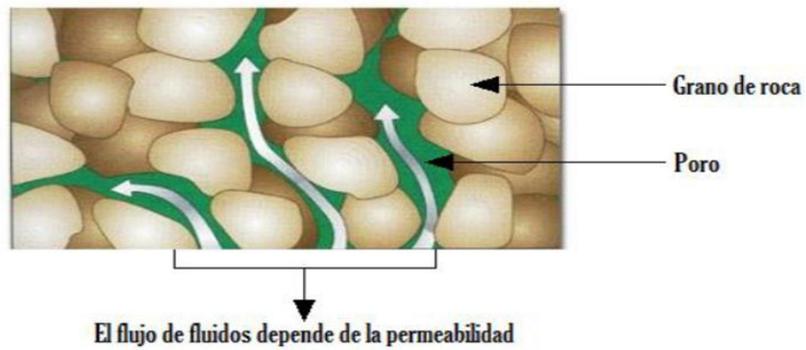


Figura 1.7 Permeabilidad absoluta  
 Fuente: (Abanto & Winter, 2018)

- **Permeabilidad efectiva:** Para los autores (Abanto & Winter, 2018), esta presenta dos fases con canales de fluido por donde circula el fluido, la misma se da cuando se ha logrado la saturación de un medio poroso.

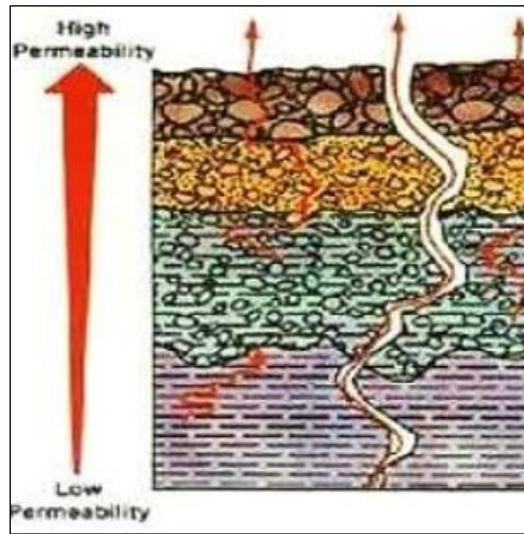


Figura 1.8 Permeabilidad efectiva  
Fuente: (Abanto & Winter, 2018)

- **Permeabilidad relativa:** Relaciona la permeabilidad efectiva y absoluta, expresándose como fracción, dependerá de las fases que existan en la roca.

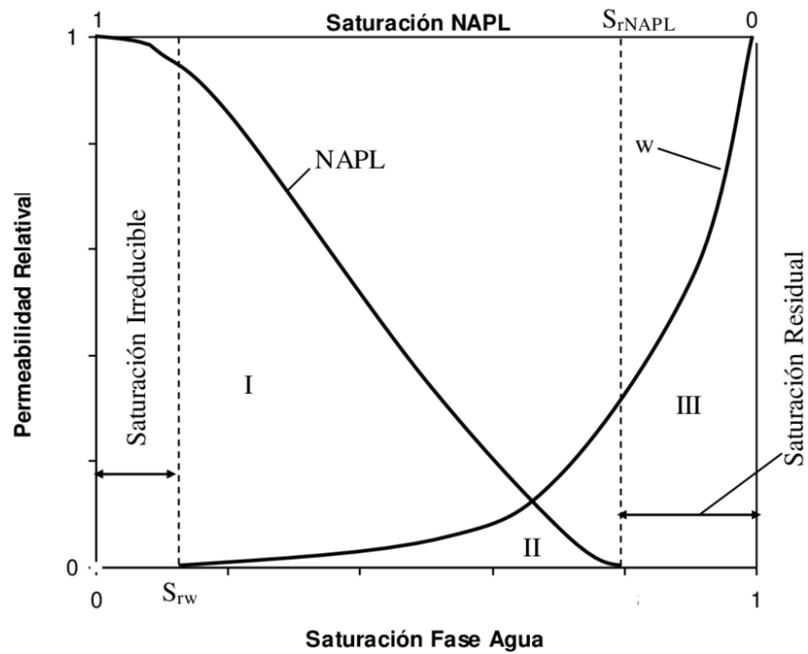


Figura 1.9 Permeabilidad efectiva  
Fuente: (Fetter, 1993)

### 1.2.3 Capilaridad

Según el estudio de (Benavente, 2006), la capilaridad depende de la tensión superficial, por lo que se relaciona con la durabilidad de las rocas, ya que el movimiento del agua en medios saturados varía dependiendo del tamaño de los poros. El ascenso de un fluido se debe a la baja cohesión que existe entre el líquido y el tubo capilar con el que está en contacto, existiendo una diferencia de presión por la presencia de la interfase.

La capilaridad es el resultado de un movimiento ascendente descendente de un líquido en el interior de un tubo de material sólido, la fuerza que permite este movimiento es conocida como tensión superficial. (Agasco, 2007) revela que cuando el ángulo se encuentra entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  el líquido moja a los sólidos generando un ascenso del primero, en el caso de que el ángulo esté comprendido entre  $90$  y  $180^\circ$ , el sólido no es mojado por el líquido y genera un descenso por el capilar; la altura a la que asciende o desciende el líquido no solo depende del ángulo de contacto, sino también del radio capilar.

$$h = \frac{2Slv \cdot \cos \theta}{\rho \cdot g \cdot r} \quad (11)$$

Donde:

$Slv$  = Tensión superficial liquido-vapor (N/m)

$\Theta$  = Ángulo de contacto

$\rho$  = densidad del líquido  $\text{kg/m}^3$

$g$  = gravedad o aceleración  $\text{m/s}^2$

$r$  = radio del poro (m)

La presión que separa a los fluidos en las interfases, se conoce como presión capilar, misma que al conocer la mojabilidad de la roca se expresa como la diferencia que existe entre la presión de la fase no mojante y la mojante siendo siempre positiva.

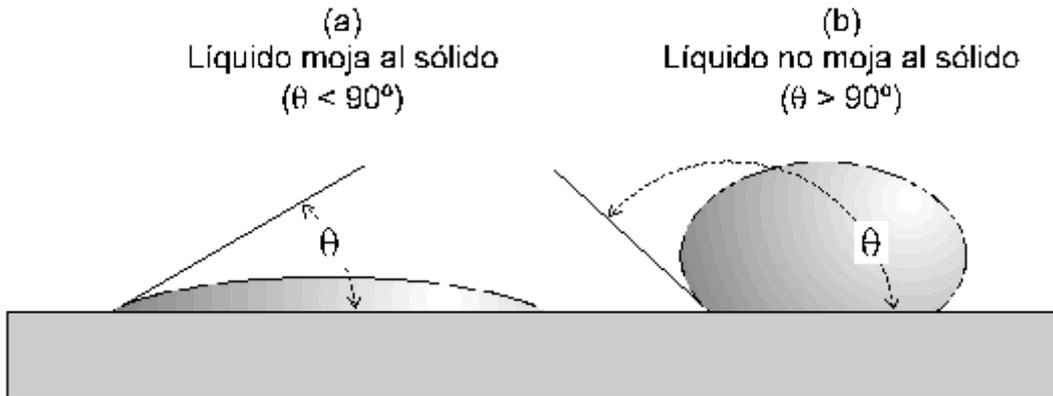


Figura 1.10 Variación en el ángulo de contacto sólido-líquido  
Fuente: (Benavente, 2006)

### 1.2.4 Saturación del agua

La fracción del volumen de poroso que está ocupada por un fluido se la conoce como saturación de al agua, (Rojas, 2011) determina que la sumatoria de las saturaciones de todos los fluidos presentes en una roca que se encuentren en espacio poroso debe ser igual a 1.

$$S = \frac{V}{V_T} \quad (12)$$

Donde

S= Saturación de la fase

V= Volumen que ocupa la fase (m<sup>3</sup>)

V<sub>T</sub>= Volumen poroso total de la roca (m<sup>3</sup>)

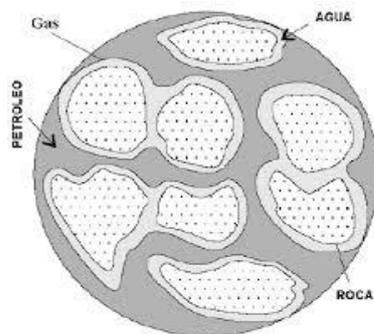


Figura 1.11 Saturación del agua en rocas  
Fuente: (Rojas, 2011)

En yacimientos hidrocarburíferos la saturación es considerada como connata y esto se da debido a que el agua depositada en el proceso de formación no fue desplazada, esto se explica según (Rojas, 2011) porque la saturación se la puede correlacionar con la permeabilidad, área superficial y tamaño del poro. La saturación aumenta mientras mayor sea el área y menor el tamaño de los poros.

Su cálculo se lo hace mediante:

- Curvas de presión capilar
- Registros eléctricos
- Núcleos en pozos

Para el cálculo mediante registros eléctricos se utiliza la ecuación planteada por Archie's

$$S_w = \sqrt[n]{\frac{\alpha^* R_T}{\phi^{m^*} R_T}} \quad (13)$$

Donde:

R<sub>w</sub> = Resistividad del agua de formación. (Ωm)

R<sub>T</sub> = Resistividad verdadera de la formación (Ωm)

Φ = porosidad

n = exponente de saturación

m = Factor de cementación

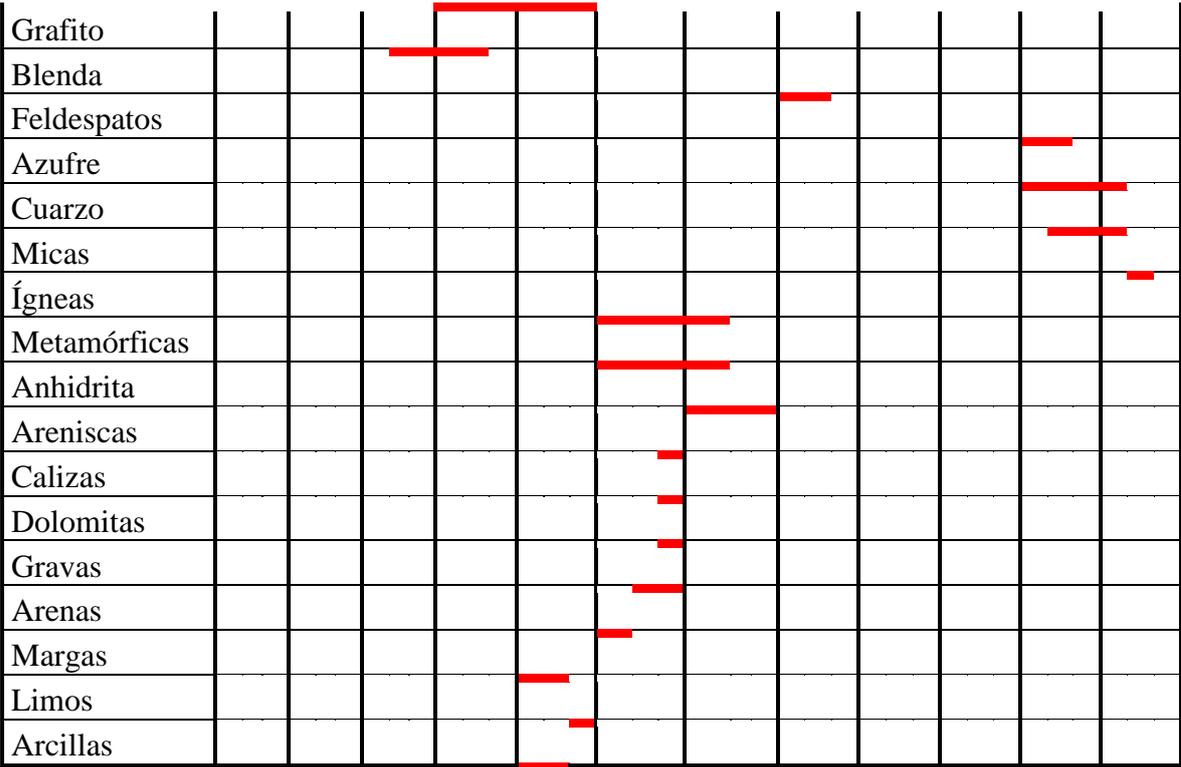
a = Factor de Tortuosidad generalmente se asume como 1

### 1.2.5 Absorción y adsorción

La absorción no es más que el agua que llena los poros de una muestra rocosa que se encuentra sumergida en líquido, estableciendo una relación porcentual entre el peso del agua absorbida con respecto al peso de la muestra seca. La absorción es la capacidad de retención o incorporación de líquidos en el sistema poroso, su cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\text{Peso saturado}(kg) - \text{Peso en seco}(kg)}{\text{Peso en seco}(kg)} \quad (14)$$





Fuente: (Benavente, Bernabéu, & Cañaveras, 2008)

Las rocas ígneas y metamórficas por el grado de fracturación que poseen hacen que sus resistividades sean altas, mientras que las rocas sedimentarias al ser más porosas poseen mayor cantidad de agua en sus poros disminuyendo la resistencia al paso de corriente por las mismas, y en metales como el hierro el valor de la resistividad eléctrica es sumamente bajo. A continuación, se detalla el comportamiento eléctrico de algunos materiales (Benavente, Bernabéu, & Cañaveras, 2008):

- Metales como el oro, plata, cobre, estaño y el grafito tienen una resistividad muy baja debido a la capacidad de desplazamiento de los electrones, es decir a la alta capacidad de traspaso de electricidad. Sus valores varían entre  $10^{-8} - 10^{-7} \Omega m$ , pero dichos valores no son de gran interés, ya que generalmente se los encuentra formando compuestos minerales y no como metales nativos. (Benavente, 2006)
- La bornita, magnetita, pirrotina entre otros, son considerados como semiconductores, es decir que la capacidad de traspaso de energía disminuye con respecto a los metales, siendo necesario el uso de campos eléctricos para obtener una buena conducción

- Las micas, feldespatos, cuarzo, calcita y silicatos de manera general poseen resistividades de alrededor  $10^7 \Omega\text{m}$ , considerándolos como dieléctricos. (Benavente, 2006)

La resistividad eléctrica en los materiales depende de factores como:

- Relación proporcional existente entre el volumen de poros y volumen total de la roca, pues mientras mayor sea el volumen, menor es la resistencia.
- Factor de formación de los poros, pues si estos se encuentran unidos y llenos de fluido (agua), menor será la resistividad por la facilidad de transporte de iones.
- Relación proporcional entre poros ocupados con agua y poros secos. Archie en 1942 formuló una relación entre la resistividad de la roca y del fluido la porosidad, estableciendo su primera ley.

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (15)$$

$$F = \alpha * \phi^{-m} \quad (16)$$

Donde

$\rho$ = Resistividad de la roca ( $\Omega\text{m}$ )

$\rho_w$ = Resistividad del fluido de formación ( $\Omega\text{m}$ )

$\alpha$ = factor de ajuste, en rocas sedimentarias es te valor está en un rango de 0.6 a 1

$m$ =factor de cementación cuyo valor varía entre 1.3 a 2.15.

### 1.3.1 Efecto de la edad geológica en la resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica de las rocas aumenta según la edad geológica que presentan las rocas debido a su compactación, esto asociado con el espesor de las rocas situadas encima de las rocas antiguas. Generalmente las rocas de la edad terciaria poseen valores altos de resistividad, mientras que las del periodo mesozoico poseen valores bajos en comparación de las anteriores.

Tabla 1.32 Resistividad en función de la edad geológica en  $\Omega\text{m}$

Fuente: (Da Silva, 2012)

Edad geológica	Arena marina, pizarra, grauvaca	Arenas terrestres. Argilita, arcosa	Rocas volcánicas como basaltos, riolitas, tobas	Granito, grabo	Caliza, dolomita, anhidrita, sal
Cuaternario, Terciario	1-10	15-20	10-200	500-2000	50-5000
Mesozoico	5-20	25-100	20-500	500-2000	100-10000
Carbonífero	10-40	50-300	50-1000	1000-5000	200-100000
Paleozoico, hasta el fin del carbonífero	40-20	100-500	200-2000	1000-5000	10000-100000
Precámbrico	100-2000	300-5000	200-5000	50000-20000	10000-100000

### 1.3.2 Factores que afectan la resistividad

El carácter iónico del fluido de formación, incide sus factores de concentración, temperatura, viscosidad y presión para la determinación de la resistividad del mismo. La porosidad y el porcentaje de saturación también influyen la resistividad eléctrica de las rocas, pues mientras mayor sea el número de poros ocupados por el agua, menor será la capacidad de paso de corriente. (Estrada, 2015)

#### Temperatura y viscosidad

Son dos factores que afectan la movilidad de los electrolitos según (Toledo, 2013), pues un aumento o disminución de temperatura genera variaciones en la viscosidad, por lo que es necesario corregir la resistividad, la corrección más conocida es la de Schlumberger.

$$\rho(25^{\circ}\text{C}) = \rho(T) \frac{T+21.5}{25+21.5} \quad (17)$$

#### Presión

El aumento de presión en las rocas sedimentarias incrementa el grado de compactación de las mismas, disminuyendo el tamaño de los poros y una variación en la viscosidad de estas, aumentando así su resistividad, mientras que en rocas muy compactadas como las ígneas y metamórficas, la presión generada en las mismas provoca un fracturamiento en su matriz, disminuyendo su resistividad.

## Naturaleza y concentración de los iones

Los responsables del paso de corriente en los electrolitos son los iones, (Toledo, 2013) expone que debido a su capacidad de desplazamiento la concentración de los mismos permite encontrar un valor de CINA necesario para que se dé el paso de corriente eléctrica. Este valor podemos encontrarlo en el ábaco planteado por Schlumberger.

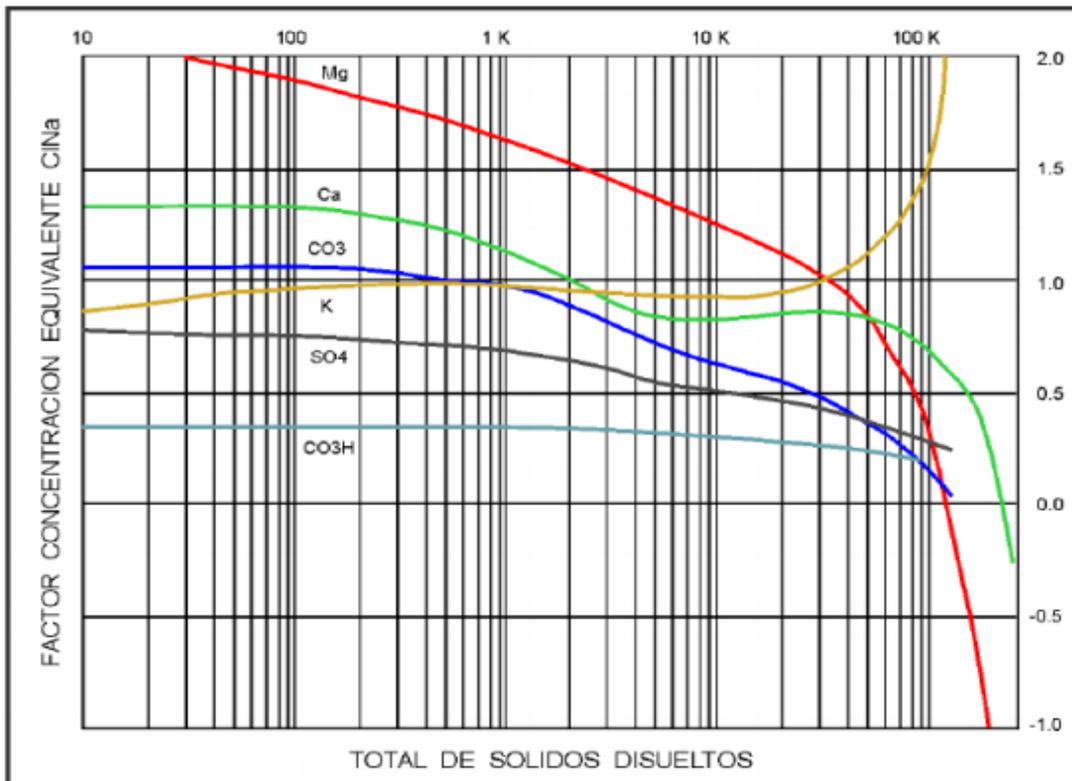


Figura 1.13 Ábaco Gen-8 Schlumberger  
Fuente: (Toledo, 2013)

## Anisotropía

La anisotropía en la resistividad eléctrica hace referencia a la dirección en las que esta es medida, generalmente las rocas sedimentarias presentan esta propiedad. El estudio de (Toledo, 2013) determinó que la anisotropía es determinada en los 3 ejes, generalmente  $\rho_x = \rho_y \neq \rho_z$ , es decir se obtendrán 2 valores de resistividad, un longitudinal y un transversal.

La resistividad media se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$\rho = \sqrt{\rho_{\perp} * \rho_m} \text{ (\Omega m)} \text{ (18)}$$

#### 1.4 Efectos del agua en la resistividad eléctrica

La escasa disociación que posee el agua pura, lo convierte en un aislante de corriente eléctrica, lo que no sucede con las aguas naturales, pues estas presentan sales disueltas, que varían según el tipo de roca y la cantidad en la que se encuentran presentes oscila entre 0.1g/l y 35g/l. (Solana, 2014)

Tabla 1.3 Márgenes de variación de la resistividad de las aguas

Agua de lagos y arroyos de alta montaña	10 a 3 10 <sup>3</sup> Ω.m
Aguas dulces superficiales	10 a 10 <sup>3</sup> Ω.m
Aguas salobres superficiales	2 a 10 Ω.m
Aguas subterráneas	1 a 20 Ω.m
Aguas de lagos salados	0.1 a 1 Ω.m
Aguas marinas	0.2 Ω.m
Aguas de impregnación de rocas	0.3 a 10 Ω.m

Fuente: (Solana, 2014)

La resistividad del agua puede calcularse mediante la concentración de sales que presenta y la temperatura, mientras mayor es el contenido de sales disueltas dentro de la roca, menor será el impedimento de paso de corriente, es decir la resistividad.

El contenido de iones disueltos y concentrados en el agua, la viscosidad, temperatura y presión a la que se encuentren sometidos son de gran importancia para (Solana, 2014), ya que permiten determinar la conductividad del fluido, en el caso de solo existir una sal en disolución relaciona la concentración iónico con la conductividad es simple. Los iones que comúnmente están presentes en el agua son: magnesio, calcio, potasio, cloruros, sulfatos, carbonatos, cloro y sodio, siendo estos dos últimos los más abundantes.

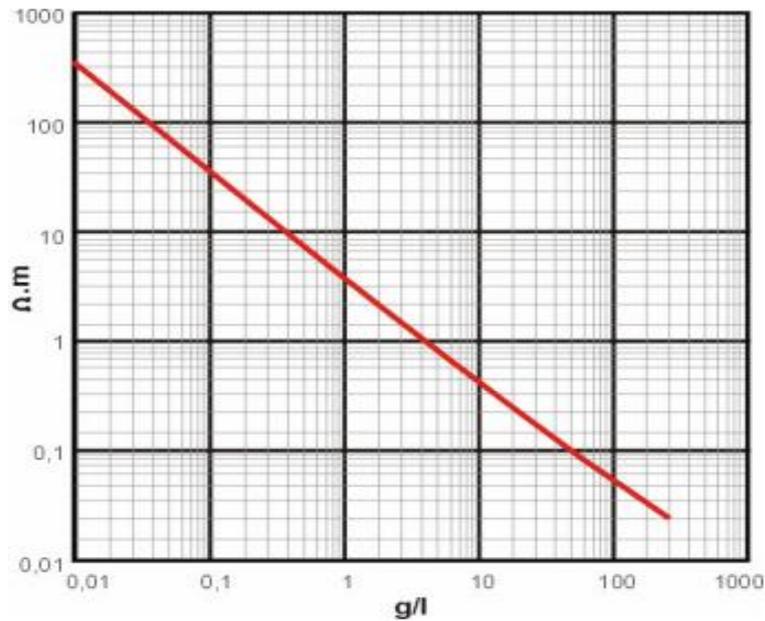


Figura 1.14 Resistividad de una solución ClNa en función de su concentración  
Fuente: (Solana, 2014)

### 1.5 Resistencia a la compresión simple

El comportamiento mecánico de las rocas es de gran importancia, pues condiciona la durabilidad de estas según sus características físicas y petrográficas, mismas que intervienen dentro del estudio de estabilidad de los macizos debido a las tensiones y esfuerzos que las rocas soportan, puesto que pueden generar deformaciones y roturas. La resistencia a la compresión uniaxial consiste en la aplicación de un esfuerzo máximo sobre muestras cúbicas o cilíndricas de material, hasta que estas tiendan a fracturarse, es decir es la fuerza por unidad de área aplicada sobre una muestra y se determina mediante la siguiente fórmula: (Monge & Ramírez, 2004)

$$\sigma_c = \frac{F_c}{A} \quad (19)$$

Donde

$\sigma_c$  = Resistencia a la compresión simple

$F_c$  = Fuerza a la que falla la muestra (kgf)

$A$  = Área de aplicación ( $cm^2$ )

Según la norma UNE-22-185-85 las probetas cubicas deben tener dimensiones de 7cm y las cilíndricas un diámetro de 7 cm y la relación h/d = 1, las muestras deben estar saturadas en agua, mientras que la normativa UNE-EN 1926, establece que las probetas deben ser

secas y su tamaño tanto para muestras cilíndricas o cúbicas puede variar entre 5 o 7 cm. La norma ISRM y UNE 33-950-90, es utilizada únicamente en probetas cilíndricas con las siguientes especificaciones:

- Relación altura-diámetro entre 2.5 y 3.
- El diámetro debe ser 10 veces mayor al tamaño más grande del grano de la roca.
- El diámetro no debe ser inferior a 5cm.
- Las probetas deben ser planas y libres de irregularidades, las bases deben formar un ángulo recto con el eje de las mismas.

El instrumento utilizado para medir la resistencia a la compresión es una prensa hidráulica, en donde la tensión aplicada debe ser uniaxial en todos sus puntos. Al presentarse fricciones tanto en las probetas como en las placas de la prensa aparecen tensiones cortantes en las proximidades de sus superficies, esto según (Monge & Ramírez, 2004) ocasiona una compresión triaxial en diversos puntos de las rocas.

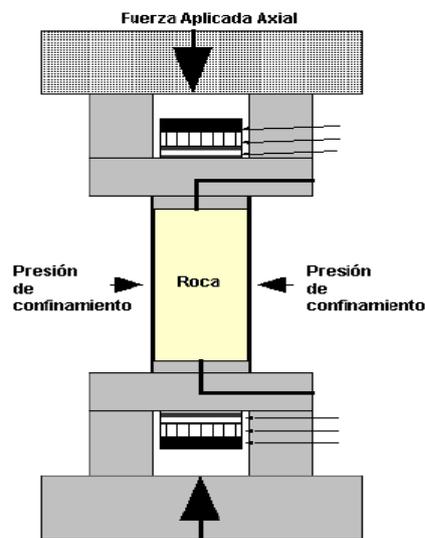


Figura 1.15 Prueba de compresión simple  
Fuente: (Monge & Ramírez, 2004)

Uno de los ensayos más utilizados para la determinación de la resistencia mecánica es la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas, en base a las constantes elásticas según el módulo de Young y el coeficiente de Poisson, este ensayo permite clasificar a las rocas según su resistencia y determina la deformabilidad de las mismas. Para (Benavente,

2006) los casos en los que las rocas se rompen por compresión son por fragmentación y fractura.

- **Fragmentación:** Se da cuando no existe una interacción entre las fisuras y estas son homogéneas, se da en rocas porosas.
- **Fractura:** La fracturación es generada por la anisotropía de las rocas y la concentración de fisuras que estas presentan, estas fracturas se dan cuando se ha llegado a la resistencia máxima que soportan las rocas.

Al aumentar el esfuerzo y superarse el límite elástico, la deformación es en parte permanente y aumenta rápidamente, pues el aumento de estos esfuerzos genera un punto de ruptura produciendo una fracturación por cizalla o fisuración extensional.

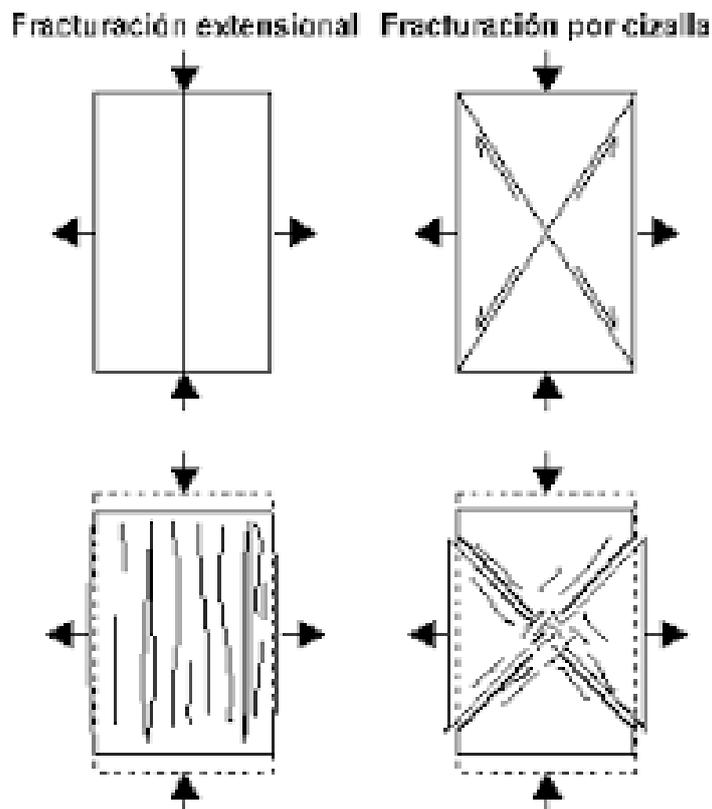


Figura 1.16 Desarrollo de fracturas extensionales y de cizalla como resultado de compresión.

Fuente:(Monge & Ramírez, 2004)

Las probetas al ser sometidas a esfuerzos, presentan 2 tipos de deformaciones, cuando la probeta recupera su forma y volumen luego de la aplicación de fuerzas externas sobre la misma, se trata de una deformación elástica, lo contrario a esta característica se considera como deformación plástica. Este comportamiento es analizado mediante la ley de Hooke,

expresado en un diagrama esfuerzo- deformación unitaria que permite definir el módulo de elasticidad, cuyo valor es la constante de proporcionalidad y es distinto para cada material.

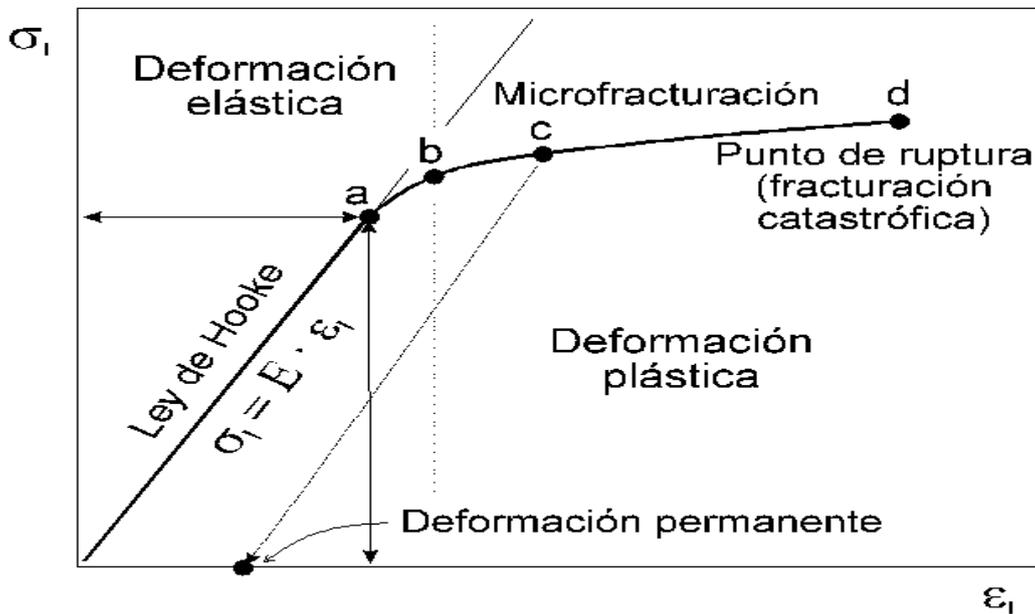


Figura 1.17 Curva esfuerzo-deformación para compresión, con ilustración de los tramos elástico y plástico.

Fuente: (Benavente, 2006)

Al superarse el límite elástico por el aumento del esfuerzo, aumenta también la deformación, mientras mayor sea el esfuerzo, mayor es la posibilidad de la roca de llegar a su punto de ruptura, mismo que se conoce como la resistencia a la compresión. Los valores en rocas de construcción oscilan dependiendo del material: (Benavente, 2006)

- Rocas muy débiles < 70kg/ cm<sup>2</sup>
- Rocas débiles entre 70-200kg/ cm<sup>2</sup>
- Rocas moderadamente resistentes entre 200-700 kg/ cm<sup>2</sup>
- Rocas fuertes entre 700-1400 kg/ cm<sup>2</sup>
- Rocas muy fuertes > 1400 kg/ cm<sup>2</sup>

Según estimaciones en el terreno, una roca es resistente cuando requiere más de un golpe con el martillo geológico, y sus valores varían entre 50 y 100 MPa como se indica en la tabla 1.4, mientras que según la clasificación ingenieril los valores varían entre 55 y 110 MPa. (Tabla 1.5) (Agasco, 2007)

Tabla 1.4 Dureza de las rocas frente al martillo geológico

GRADO	CLASIFICACIÓN	IDENTIFICACIÓN	RANGO APROX. DE R.C.U (MPa)
D-0	Roca extremadamente débil	El espécimen es indentado por la uña del dedo pulgar	0.25 -1.00
D-1	Roca muy débil	Se desmorona con golpes firmes, con la punta del martillo de geólogo. Puede ser descascarillado con un cuchillo de bolsillo	1.0-5.0
D-2	Roca débil	Se descascarilla con dificultad, con un cuchillo de bolsillo; indentado poco profundo con golpes firmes con la punta del martillo de geólogo	5.0-25.0
D-3	Roca moderadamente resistente	No se puede raspar o descascarillar con cuchillo de bolsillo. El espécimen puede ser fracturado con un solo golpe firme de martillo	25.0-50.0
D-4	Roca resistente	El espécimen requiere de más de un golpe firme de martillo	50.0-100.0
D-5	Roca muy resistente	El espécimen es fracturado con muchos golpes de martillo	100.0-250.0
D-6	Roca extremadamente resistente	El martillo produce solamente el descascarillado de las muestras. Sonido metálico de golpe	>250.0

Fuente: (Agasco, 2007)

Tabla 1.5 Clasificación ingenieril de las rocas

Clase	Descripción	R.C.U		Tipo de roca
		(PSI)	(MPa)	
A	Resistencia muy alta	32.000	220	Cuarcitas, diabasas, mayoría de rocas ígneas, ciertas rocas metamórficas,
B	Resistencia alta	16.000-32.000	100-220	areniscas frágilmente cementadas, lutitas resistentes, mayoría de calizas, ciertas dolomitas
C	Resistencia media	8.000-16.000	55-110	Algunas lutitas, areniscas y calizas porosas, esquistos y rocas metamórficas
D	Resistencia baja	4.000-8.000	28-55	Rocas porosas de baja densidad, areniscas deleznable, tufas y lutitas arcillosas, rocas meteorizadas y
E	Resistencia muy baja	4.000	28	químicamente alteradas de cualquier litología

Fuente: (Agasco, 2007)

La mayoría de las rocas son resistentes a la compresión, sin embargo, no lo son a la tensión y flexión, las rocas sedimentarias debido a su grado de concentración y porosidad que presentan son las más débiles. La resistencia aumenta a medida que incrementa el tamaño del grano de las rocas, sin embargo, (Agasco, 2007) enfatiza que no se puede generalizar este efecto. Otras de las variables que intervienen en la determinación de la resistencia son la composición mineral, estructura, porosidad y cementación que posean las rocas.

La resistencia a la compresión es función de las fuerzas cohesivas y friccionales, mismas que están condicionadas por la magnitud de los esfuerzos confinantes, la velocidad con la que se aplica la carga de rotura, agua presente en los poros, el ángulo de fricción en la mayoría de rocas varía entre 25 ° y 45°; estos factores hacen que el valor de la resistencia no sea único, incluso en rocas isótropas y homogéneas puede variar según el grado de cementación o mineralogía de las rocas.

Tabla 1.6 Clasificación de las rocas según la R.C.U

Descripción	Resistencia a la Compresión Simple en MPa	Ejemplo de Roca
Resistencia muy baja	1-25	Yeso, sal de roca
Resistencia baja	25-50	Carbón, limonita, esquisto
Resistencia media	50-100	Arenisca, pizarra, lutita
Resistencia alta	100-200	Mármol, granito, gneis
Resistencia muy alta	>200	Cuarcita, grabo, basalto

Fuente: (Agasco, 2007)

Los resultados de la resistencia de las rocas obtenidos mediante experimentación pueden variar, de acuerdo a la forma de la probeta utilizada, en prismas y cilindros este valor es menor que en cubos de la misma sección, además depende de la aplicación de la carga sobre la muestra, mientras mayor sea la velocidad con la que se aplica la fuerza mayor será la resistencia. (Agasco, 2007)

## CAPÍTULO II

### EXPERIMENTACIÓN

En este capítulo se explicará de manera detallada la manera en cómo se procedió a trabajar para cumplir con los objetivos anteriormente planteados. En primer lugar, se realizará la descripción de las muestras, luego el proceso para la obtención de la resistividad eléctrica y finalmente la determinación de la resistencia a la compresión simple.

Para el estudio se establecieron 2 zonas para ser analizadas, mismas que corresponden a las zonas de Cojitambo de la provincia del Cañar, y Pumayunga en la provincia del Azuay.

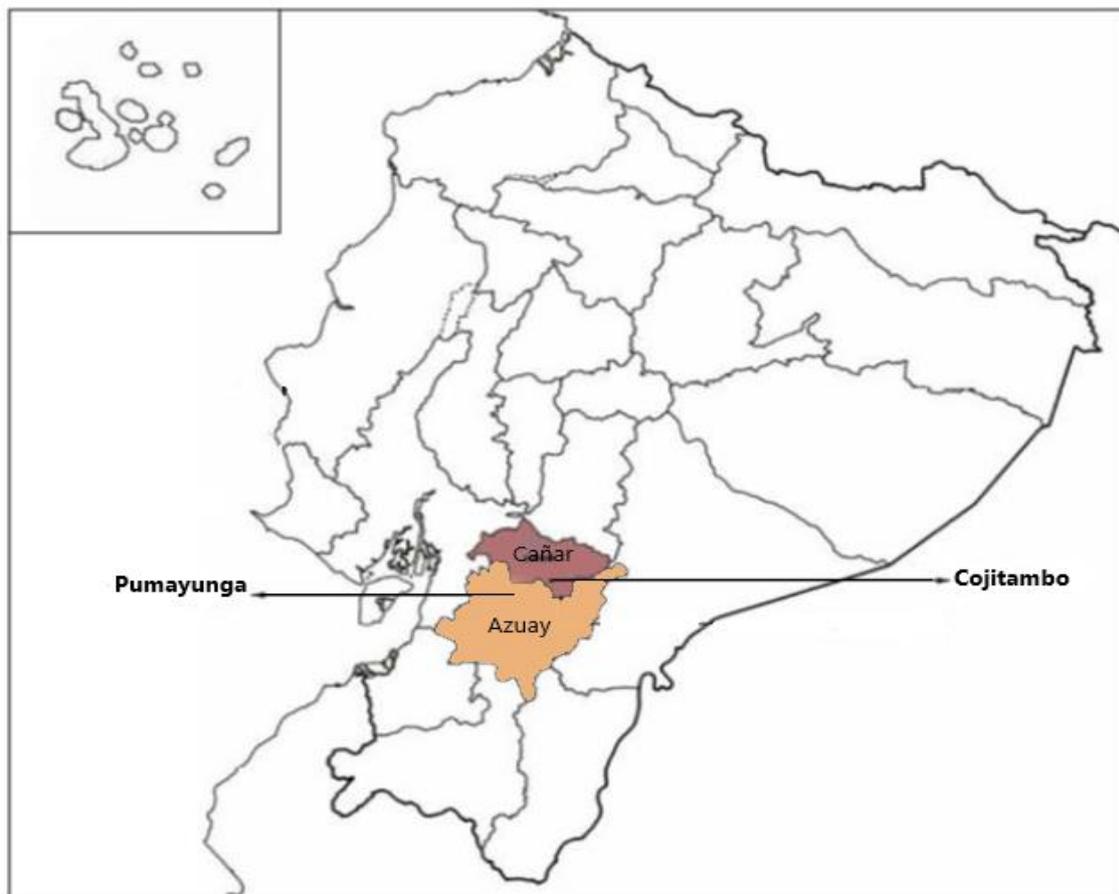


Figura 2.1 Mapa de Ubicación de las zonas de estudio  
Fuente: Autoría propia

## 2.1 Descripción de las muestras

Las zonas a ser analizadas en la presente investigación como ya se mencionaron anteriormente corresponden a las zonas de Cojitambo y Pumayunga, para lo cual se hará una breve descripción de cada una de estas.

- **Cojitambo**

Esta zona se encuentra asentada sobre la formación geológica Biblián (Mb) como se observa en la figura 2.2

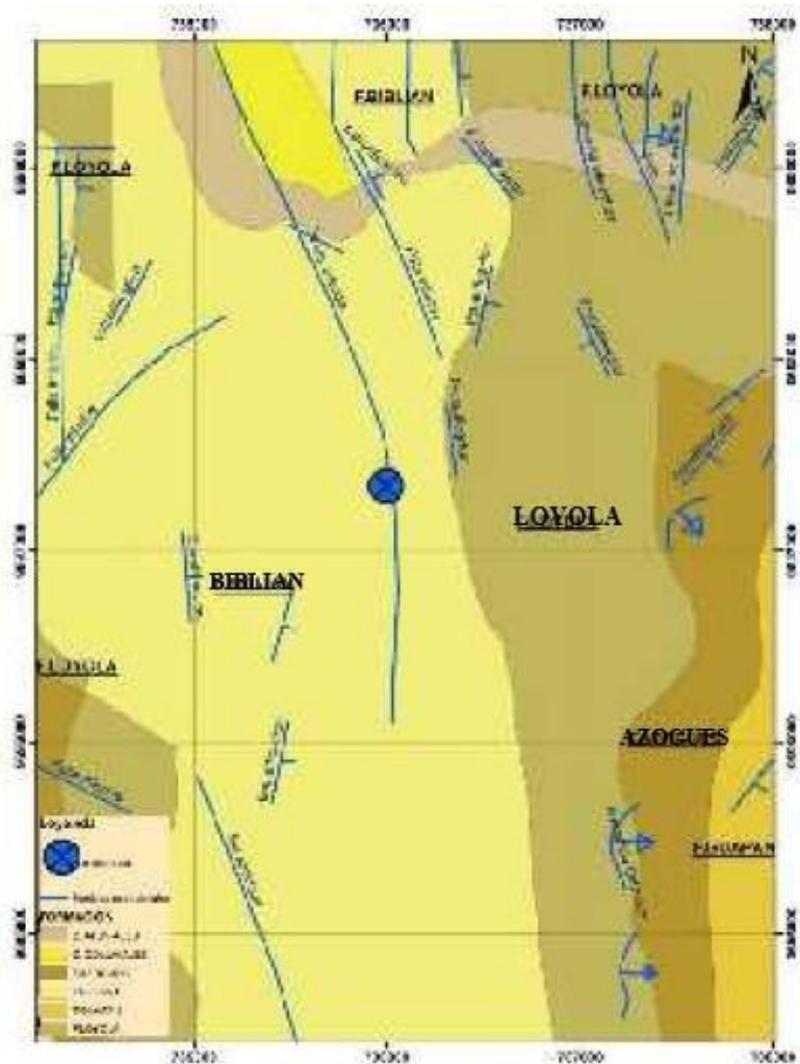


Figura 2.2 Mapa geológico- Cojitambo

Fuente: (Steinmann, 1977)

La Formación Biblián aflora sobre el principal anticlinal, va desde el norte de Biblián hasta aproximadamente El Valle de Cuenca, esta formación descansa sobre la Formación Yunguilla y sobre el grupo de rocas del Grupo Saraguro. El estudio de (Steinmann, 1977) indica que las rocas existentes en la zona son areniscas finas y gruesas, además de encontrarse conglomeradas se debe recalcar que existe mayor predominancia de sedimentos gruesos que contienen cuarzo y líticas de rocas metamórficas.

- **Pumayunga**

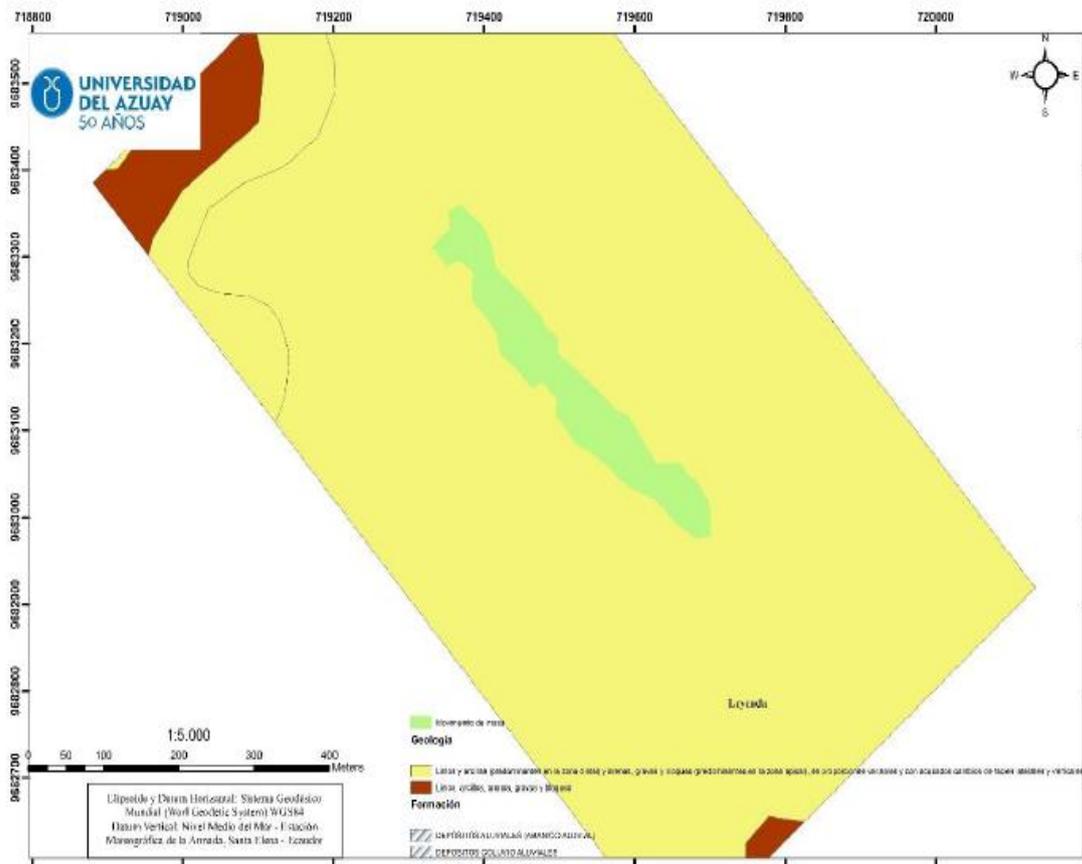


Figura 2.3 Mapa geológico - Pumayunga  
 Fuente: Geomorfología; SIGTierras; 2020 actualización a 2018

La zona de estudio Pumayunga pertenece a la parroquia de Sinincay, en ella se encuentran depósitos aluviales y Coluviales con presencia de limos y arcillas. La investigación de (Rodas Toral, 2019) determinó que la secuencia estratigráfica de la zona es un basamento de volcanismo donde afloran sedimentos.

## 2.2 Preparación de las muestras

Para la ejecución del siguiente trabajo se realizaron en total 30 muestras que corresponden a 15 muestras de la zona de Cojitambo en la provincia del Cañar y 15 muestras de la zona de Pumayunga en la provincia del Azuay. Las muestras deben ser lo más homogéneas posibles, sin mayores alteraciones ni fracturas.

Luego de su obtención, estas fueron enviadas a un taller para cortarlas en forma de paralelepípedos, teniendo como resultado dos probetas de cada muestra que dan un total de 30 probetas por zona 15 de tamaño grande y 15 de tamaño pequeño como se muestra continuación:

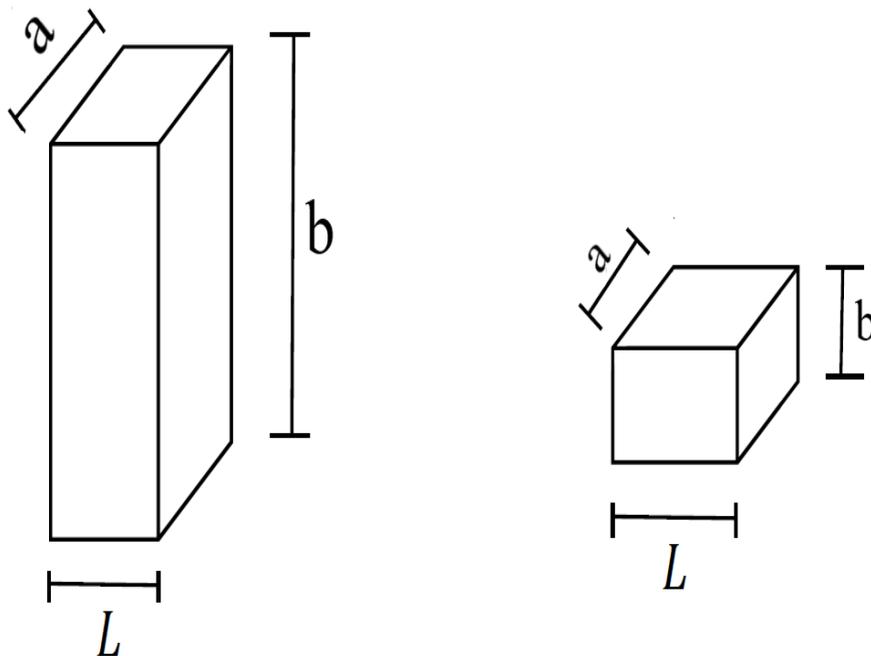


Figura 2.4 Tamaño de las probetas  
Fuente: Autoría propia



Figura 2.5 Probetas reales grandes- Cojitambo  
Fuente: Autoría propia



Figura 2.6 Probetas reales pequeñas Cojitambo  
Fuente: Autoría propia



Figura 2.7 Probetas grandes- Pumayunga  
Fuente: Autoría propi



Figura 2.8 Probetas pequeñas- Pumayunga  
Fuente: Autoría propia

Tabla 2.1 Tamaño de las muestras grandes Cojitambo

Muestra	a (cm)	b (cm)	L (cm)
1	4.8	7.45	3.4
2	4.95	8.75	3.2
3	5	8.1	3.5
4	4.95	8.2	3.75
5	5.05	8.05	3.8
6	4.85	9.05	3.6
7	4.8	8.35	3.75
8	4.75	8.75	3.7
9	4.95	9.15	3.8
10	5	9.2	3.45
11	4.7	9.05	3.8
12	5.1	9	4.1
13	4.7	9.05	3.7
14	4.8	9.1	3.85
15	4.9	9.3	4

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.2 Tamaño de las muestras pequeñas- Cojitambo

Muestra	a (cm)	b (cm)	L (cm)
1	3.2	4.8	4
2	2.65	4.8	3.3

3	3.55	4.8	3.3
4	3.3	4.55	3.7
5	3.65	5	3.8
6	2.5	4.9	3.7
7	3.15	4.8	3.7
8	2.6	5	3.9
9	2.35	4.85	3.55
10	2.25	4.95	3.25
11	2.45	4.9	3.65
12	2.45	4.9	4
13	2.25	4.85	3.3
14	2.45	5	3.7
15	2.4	5	3.7

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.3 Tamaño de las muestras grandes – Pumayunga

	a	b	L
Muestra	(cm)	(cm)	(cm)
1	3.9	8.3	3.8
2	4.1	8.1	3.7
3	4.5	9	3.8
4	4.1	9.15	3.6
5	4.1	9	3.9
6	4.1	8.9	3.9
7	4.1	9.2	3.9
8	3.9	9.1	3.9
9	4	9	3.7
10	4	9	3.8
11	4	8.8	3.8
12	4	8.8	4
13	4	8	4
14	4.8	8.8	4
15	4.9	9	3.8

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.4 Tamaño de las muestras pequeñas-Pumayunga

	a	b	L
Muestra	(cm)	(cm)	(cm)
1	4	3	3.6

2	4	3.3	3.7
3	4.5	2.4	3.8
4	4	2.5	3.7
5	4	2.6	3.9
6	3.8	2.7	4.1
7	4.1	2.5	3.6
8	4	2.7	3.9
9	4	2.6	3.8
10	4.1	2.6	3.7
11	4	2.9	3.8
12	4	2.8	3.7
13	4	3.8	4
14	4	2.7	3.8
15	3.7	2.8	4

Fuente: Autoría propia

### 2.3 Determinación de la resistividad

Antes de realizar la medición de la resistencia eléctrica de las muestras, estas fueron colocadas en vasos de precipitación con agua durante 30 minutos.



Figura 2.9 Muestras en agua- Cojitambo

Fuente: Autoría propia

Luego de dejar reposar las muestras en agua, se procedió a medir la resistencia eléctrica de las rocas, esto se realizó con ayuda de un multímetro que es un equipo de medición eléctrica cuyo resultado nos da en mega ohmios.



Figura 2.10 Multímetro

Fuente: Autoría propia

La resistencia eléctrica fue medida en las aristas de las probetas, para lo cual se varió la posición de las muestras en lo que respecta a largo, ancho y alto de las mismas, para de esta manera obtener 3 valores por muestra, es decir un total de 90 datos por zona, donde 45 de ellos corresponden al análisis de muestras grandes y los 45 restantes a las muestras pequeñas.

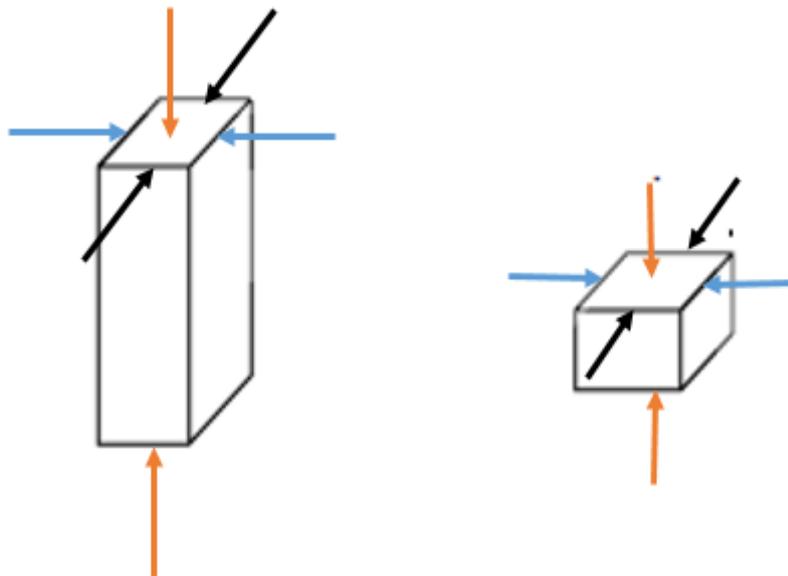


Figura 2.11 Medición de la resistividad en las aristas

Fuente: Autoría propia



Figura 2.12 Medición de la resistencia eléctrica- Cojitambo  
 Fuente: Autoría propia

Tabla 2.5 Resistencias eléctricas probetas grandes- Cojitambo

<b>Muestra</b>	<b>R1 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3 (<math>\Omega</math>)</b>
1	1400000	1030000	700000
2	1500000	1550000	650000
3	980000	1320000	790000
4	430000	1490000	910000
5	1670000	1700000	840000
6	1510000	400000	790000
7	750000	800000	1110000
8	740000	800000	980000
9	1780000	1020000	1400000
10	1300000	980000	810000
11	1080000	1150000	900000
12	1040000	1600000	1320000
13	1550000	920000	800000
14	520000	800000	680000
15	1390000	440000	910000

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.6 Resistencias eléctricas probetas pequeñas- Cojitambo

Muestra	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	R3 ( $\Omega$ )
1	1020000	1080000	730000
2	1270000	1100000	700000
3	770000	540000	610000
4	1080000	760000	510000
5	1180000	840000	1020000
6	870000	770000	460000
7	680000	310000	280000
8	950000	730000	480000
9	670000	430000	390000
10	700000	580000	400000
11	730000	570000	470000
12	1380000	750000	880000
13	830000	500000	420000
14	620000	370000	410000
15	800000	410000	530000

Fuente: Autoría propia



Figura 2.13 Muestras en agua- Pumayunga

Fuente: Autoría propia



Figura 2.14 Medición de la resistencia eléctrica- Pumayunga

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.7 Resistencias eléctricas probetas grandes- Pumayunga

<b>Muestra</b>	<b>R1 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2 (<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3 (<math>\Omega</math>)</b>
1	251000	590000	956000
2	944000	845000	578000
3	150000	1253000	802000
4	200000	794000	769000
5	202000	873000	806000
6	168000	798000	676000
7	262000	801000	724000
8	1359000	784000	820000
9	853000	1019000	747000
10	708000	513000	1153000
11	1078000	598000	822000
12	483000	667000	798000

13	855000	817000	810000
14	510000	772000	966000
15	498000	932000	856000

Fuente: Autoría propia

Tabla 2.8 Resistencias eléctricas probetas pequeñas- Pumayunga

Muestra	R1 ( $\Omega$ )	R2 ( $\Omega$ )	R3 ( $\Omega$ )
1	490000	643000	502000
2	607000	571000	488000
3	850000	602000	678000
4	713000	646000	659000
5	503000	556000	502000
6	606000	576000	505000
7	572000	347000	493000
8	465000	520000	524000
9	359000	466000	493000
10	504000	579000	600000
11	604000	638000	675000
12	588000	600000	627000
13	460000	492000	606000
14	504000	520000	460000
15	524000	576000	510000

Fuente: Autoría propia

Para determinar la resistividad eléctrica de cada muestra se aplicó la siguiente fórmula:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (20)$$

Donde

**R**= Resistencia eléctrica ( $\Omega$ )

**S**= Área o sección (a \*b) ( $cm^2$ )

**L**= Longitud (cm)

## 2.4 Determinación de la Resistencia a la compresión simple

Finalmente, luego de calcular la resistividad de las muestras, se las llevaron a laboratorio para así obtener la fuerza con la que se llega a la ruptura de las mismas, valor que nos permitirá establecer la resistencia a la compresión simple.



Figura 2.15 Muestra en la máquina de Humboldt  
Fuente: Autoría propia



Figura 2.16 Muestra sometida a una fuerza de rotura  
Fuente: Autoría propia

## CAPÍTULO III

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente trabajo fue de carácter investigativo, cuyo principal objetivo fue determinar la correlación existente entre la resistividad de las rocas y los valores de la resistencia a la compresión de las mismas, utilizando dichos resultados en la clasificación de los macizos rocosos. Para dicha aplicación se propuso utilizar equipos de medición eléctrica, en este caso un multímetro que es un equipo de fácil adquisición y manipulación.

El total de muestras a utilizadas fueron 60 probetas que corresponden a las dos zonas de estudio que fueron:

- Cojitambo, que se encuentra en la provincia del Cañar, posee una morfología multiforme con presencia de escarpes constituidos por andesitas diaclasadas.
- Pumayunga, ubicada en la provincia del Azuay, constituida por un mármol.

#### 3.1 Análisis de resistividades

En primera instancia se determinó valores de la resistencia eléctrica de cada probeta, para lo cual se utilizó un multímetro como se muestra en la figura 2.8, mediante cada uno de estos valores obtenidos y con las medidas de cada uno de los lados de las probetas se logró determinar las resistividades, mismas que se muestran a continuación en la siguientes tablas:

Tabla 3.1 Resistividades eléctricas de las probetas grandes- Cojitambo

Muestra	a (cm)	b (cm)	l (cm)	R ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega$ m)
1	4.8	7.45	3.4	1400000	147247
2	4.95	8.75	3.2	1500000	203027
3	5	8.1	3.5	980000	113400
4	4.95	8.2	3.75	430000	46543
5	5.05	8.05	3.8	1670000	178657
6	4.85	9.05	3.6	1510000	184105
7	4.8	8.35	3.75	750000	80160
8	4.75	8.75	3.7	740000	83125

9	4.95	9.15	3.8	1780000	212160
10	5	9.2	3.45	1300000	173333
11	4.7	9.05	3.8	1080000	120889
12	5.1	9	4.1	1040000	116429
13	4.7	9.05	3.7	1550000	178187
14	4.8	9.1	3.85	520000	58996
15	4.9	9.3	4	1390000	158356
16	3.4	7.45	4.8	1030000	54354
17	3.2	8.75	4.95	1550000	87677
18	3.5	8.1	5	1320000	74844
19	3.75	8.2	4.95	1490000	92561
20	3.8	8.05	5.05	1700000	102976
21	3.6	9.05	4.85	400000	26870
22	3.75	8.35	4.8	800000	52188
23	3.7	8.75	4.75	800000	54526
24	3.8	9.15	4.95	1020000	71647
25	3.45	9.2	5	980000	62210
26	3.8	9.05	4.7	1150000	84146
27	4.1	9	5.1	1600000	115765
28	3.7	9.05	4.7	920000	65545
29	3.85	9.1	4.8	800000	58392
30	4	9.3	4.9	440000	33404
31	4.8	3.4	7.45	700000	15334
32	4.95	3.2	8.75	650000	11767
33	5	3.5	8.1	790000	17068
34	4.95	3.75	8.2	910000	20600
35	5.05	3.8	8.05	840000	20024
36	4.85	3.6	9.05	790000	15241
37	4.8	3.75	8.35	1110000	23928
38	4.75	3.7	8.75	980000	19684
39	4.95	3.8	9.15	1400000	28780
40	5	3.45	9.2	810000	15188
41	4.7	3.8	9.05	900000	17761
42	5.1	4.1	9	1320000	30668
43	4.7	3.7	9.05	800000	15372
44	4.8	3.85	9.1	680000	13809
45	4.9	4	9.3	910000	19178

Fuente: Autoría propia

Tabla 3.2 Resistividades eléctricas probetas pequeñas- Cojitambo

a	b	l	R	Resistividad
---	---	---	---	--------------

Muestra	(cm)	(cm)	(cm)	( $\Omega$ )	( $\Omega$ m)
1	3.2	4.8	4	1020000	39168
2	2.65	4.8	3.3	1270000	48953
3	3.55	4.8	3.3	770000	39760
4	3.3	4.55	3.7	1080000	43828
5	3.65	5	3.8	1180000	56671
6	2.5	4.9	3.7	870000	28804
7	3.15	4.8	3.7	680000	27788
8	2.6	5	3.9	950000	31667
9	2.35	4.85	3.55	670000	21511
10	2.25	4.95	3.25	700000	23988
11	2.45	4.9	3.65	730000	24010
12	2.45	4.9	4	1380000	41417
13	2.25	4.85	3.3	830000	27447
14	2.45	5	3.7	620000	20527
15	2.4	5	3.7	800000	25946
16	4	4.8	3.2	1080000	64800
17	3.3	4.8	2.65	1100000	65751
18	3.3	4.8	3.55	540000	24095
19	3.7	4.55	3.3	760000	38772
20	3.8	5	3.65	840000	43726
21	3.7	4.9	2.5	770000	55840
22	3.7	4.8	3.15	310000	17478
23	3.9	5	2.6	730000	54750
24	3.55	4.85	2.35	430000	31504
25	3.25	4.95	2.25	580000	41470
26	3.65	4.9	2.45	570000	41610
27	4	4.9	2.45	750000	60000
28	3.3	4.85	2.25	500000	35567
29	3.7	5	2.45	370000	27939
30	3.7	5	2.4	410000	31604
31	3.2	4	4.8	730000	19467
32	2.65	3.3	4.8	700000	12753
33	3.55	3.3	4.8	610000	14888
34	3.3	3.7	4.55	510000	13686
35	3.65	3.8	5	1020000	28295
36	2.5	3.7	4.9	460000	8684
37	3.15	3.7	4.8	280000	6799
38	2.6	3.9	5	480000	9734
39	2.35	3.55	4.85	390000	6708
40	2.25	3.25	4.95	400000	5909
41	2.45	3.65	4.9	470000	8578
42	2.45	4	4.9	880000	17600

43	2.25	3.3	4.85	420000	6430
44	2.45	3.7	5	410000	7433
45	2.4	3.7	5	530000	9413

Fuente: Autoría propia

Tabla 3.3 Resistividades eléctricas probetas grandes- Pumayunga

Muestra	A (cm)	b (cm)	l (cm)	R ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega$ m)
1	3.9	8.3	3.8	251000	21381
2	4.1	8.1	3.7	944000	84730
3	4.5	9	3.8	150000	15987
4	4.1	9.15	3.6	200000	20842
5	4.1	9	3.9	202000	19112
6	4.1	8.9	3.9	168000	15719
7	4.1	9.2	3.9	262000	25340
8	3.9	9.1	3.9	1359000	123669
9	4	9	3.7	853000	82995
10	4	9	3.8	708000	67074
11	4	8.8	3.8	1078000	99857
12	4	8.8	4	483000	42504
13	4	8	4	855000	68400
14	4.8	8.8	4	510000	53856
15	4.9	9	3.8	498000	57794
16	3.8	8.3	3.9	590000	47714
17	3.7	8.1	4.1	845000	61767
18	3.8	9	4.5	1253000	95228
19	3.6	9.15	4.1	794000	63791
20	3.9	9	4.1	873000	74737
21	3.9	8.9	4.1	798000	67558
22	3.9	9.2	4.1	801000	70097
23	3.9	9.1	3.9	784000	71344
24	3.7	9	4	1019000	84832
25	3.8	9	4	513000	43862
26	3.8	8.8	4	598000	49993
27	4	8.8	4	667000	58696
28	4	8	4	817000	65360
29	4	8.8	4.8	772000	56613
30	3.8	9	4.9	932000	65050
31	3.8	3.9	8.3	956000	17070
32	3.7	4.1	8.1	578000	10825
33	3.8	4.5	9	802000	15238

34	3.6	4.1	9.15	769000	12405
35	3.9	4.1	9	806000	14320
36	3.9	4.1	8.9	676000	12145
37	3.9	4.1	9.2	724000	12583
38	3.9	3.9	9.1	820000	13706
39	3.7	4	9	747000	12284
40	3.8	4	9	1153000	19473
41	3.8	4	8.8	822000	14198
42	4	4	8.8	798000	14509
43	4	4	8	810000	16200
44	4	4.8	8.8	966000	21076
45	3.8	4.9	9	856000	17710

Fuente: Autoría propia

Tabla 3.4 Resistividades eléctricas probetas pequeñas- Pumayunga

Muestra	a (cm)	b (cm)	l (cm)	R ( $\Omega$ )	Resistividad ( $\Omega$ m)
1	4	3	3.6	490000	16333
2	4	3.3	3.7	607000	21655
3	4.5	2.4	3.8	850000	24158
4	4	2.5	3.7	713000	19270
5	4	2.6	3.9	503000	13413
6	3.8	2.7	4.1	606000	15165
7	4.1	2.5	3.6	572000	16286
8	4	2.7	3.9	465000	12877
9	4	2.6	3.8	359000	9825
10	4.1	2.6	3.7	504000	14521
11	4	2.9	3.8	604000	18438
12	4	2.8	3.7	588000	17799
13	4	3.8	4	460000	17480
14	4	2.7	3.8	504000	14324
15	3.7	2.8	4	524000	13572
16	3.6	3	4	643000	17361
17	3.7	3.3	4	571000	17430
18	3.8	2.4	4.5	602000	12201
19	3.7	2.5	4	646000	14939
20	3.9	2.6	4	556000	14095
21	4.1	2.7	3.8	576000	16780
22	3.6	2.5	4.1	347000	7617
23	3.9	2.7	4	520000	13689
24	3.8	2.6	4	466000	11510

25	3.7	2.6	4.1	579000	13585
26	3.8	2.9	4	638000	17577
27	3.7	2.8	4	600000	15540
28	4	3.8	4	492000	18696
29	3.8	2.7	4	520000	13338
30	4	2.8	3.7	576000	17436
31	3.6	4	3	502000	24096
32	3.7	4	3.3	488000	21886
33	3.8	4.5	2.4	678000	48308
34	3.7	4	2.5	659000	39013
35	3.9	4	2.6	502000	30120
36	4.1	3.8	2.7	505000	29140
37	3.6	4.1	2.5	493000	29107
38	3.9	4	2.7	524000	30276
39	3.8	4	2.6	493000	28822
40	3.7	4.1	2.6	600000	35008
41	3.8	4	2.9	675000	35379
42	3.7	4	2.8	627000	33141
43	4	4	3.8	606000	25516
44	3.8	4	2.7	460000	25896
45	4	3.7	2.8	510000	26957

Fuente: Autoría propia

### 3.2 Análisis de la resistencia a la compresión simple

Luego de determinar la resistividad eléctrica de las rocas, estas fueron sometidas a fuerzas de corte en el respectivo equipo de ensayo que corresponde a una presa de Humboldt, este equipo permite someter a los materiales a cargas uniaxiales y triaxiales. Además de ensayos de tensión permitiendo comprobar la resistencia de los materiales, para lo cual se aplicaron cargas sobre las probetas cuyas dimensiones ya se especificaron en el capítulo anterior.

Las muestras que fueron sometidas a estos ensayos fueron las probetas de tamaño grande, cuyos valores son los mismos para las probetas de tamaño pequeño, puesto que, las dos probetas corresponden a una misma muestra. Los valores de resistencia a la compresión se los observa en la siguiente tabla:

Tabla 3.5 Valores de la resistencia a la compresión

Cojitambo	Pumayunga
-----------	-----------

Muestra	RCS (MPa)	Muestra	RCS (MPa)
1	32	1	52
2	42	2	47
3	47	3	36
4	36	4	47
5	29	5	39
6	33	6	30
7	19	7	36
8	17	8	47
9	34	9	37
10	34	10	39
11	41	11	37
12	26	12	39
13	39	13	32
14	39	14	28
15	31	15	30
Promedio	33	Promedio	38

Fuente: Autoría propia

### 3.3 Propuesta de correlación

Establecidos los resultados de los ensayos realizados se obtiene una gráfica en la cual en el eje de las abscisas se representa la resistencia eléctrica de las rocas medida en ohmios por metro ( $\Omega$  m) y en el eje de las ordenas la resistencia a la compresión.

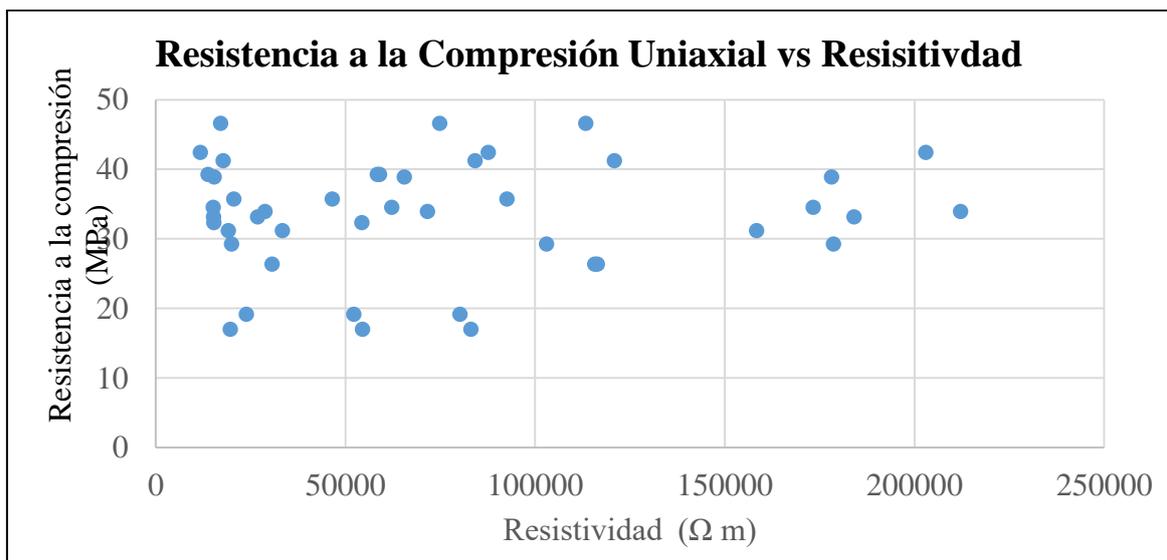


Figura 3.1 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas grandes- Cojitambo

Fuente: Autoría propia

Al analizar la gráfica de la figura 3.1 se puede observar que los datos tienden a agruparse en dos zonas pudiendo obtener un valor de RCU máximo y mínimo, en donde el límite

de cada uno de estos valores estará determinado por la ecuación obtenida en base a los datos.

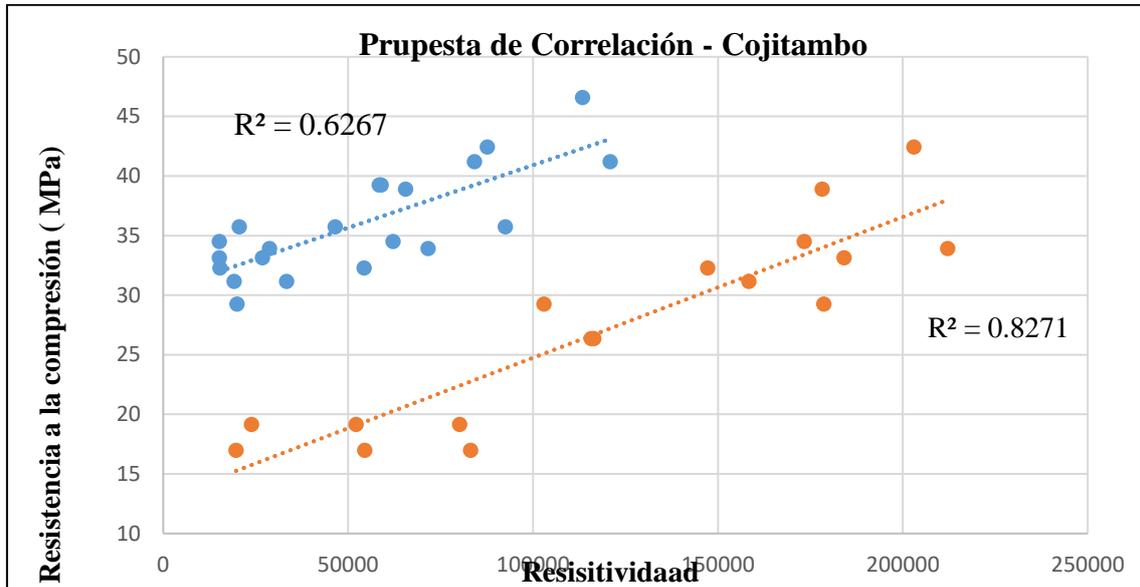


Figura 3.2 Correlación RCU Máxima y Mínima, probetas grandes- Cojitambo  
Fuente: Autoría propia

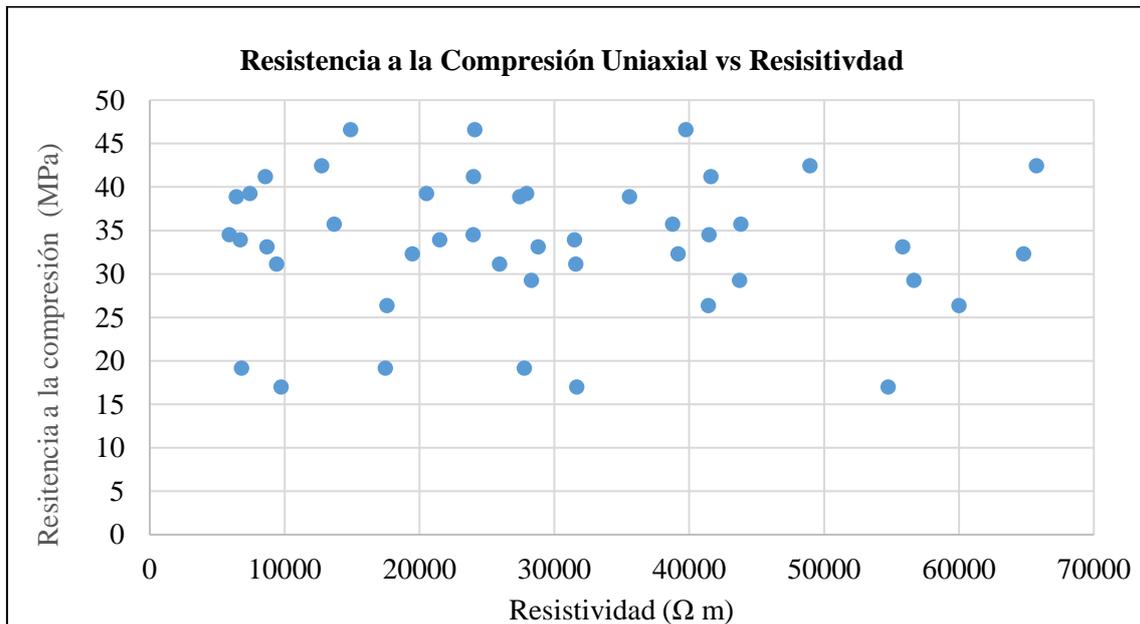


Figura 3.3 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas pequeñas – Cojitambo  
Fuente: Autoría propia

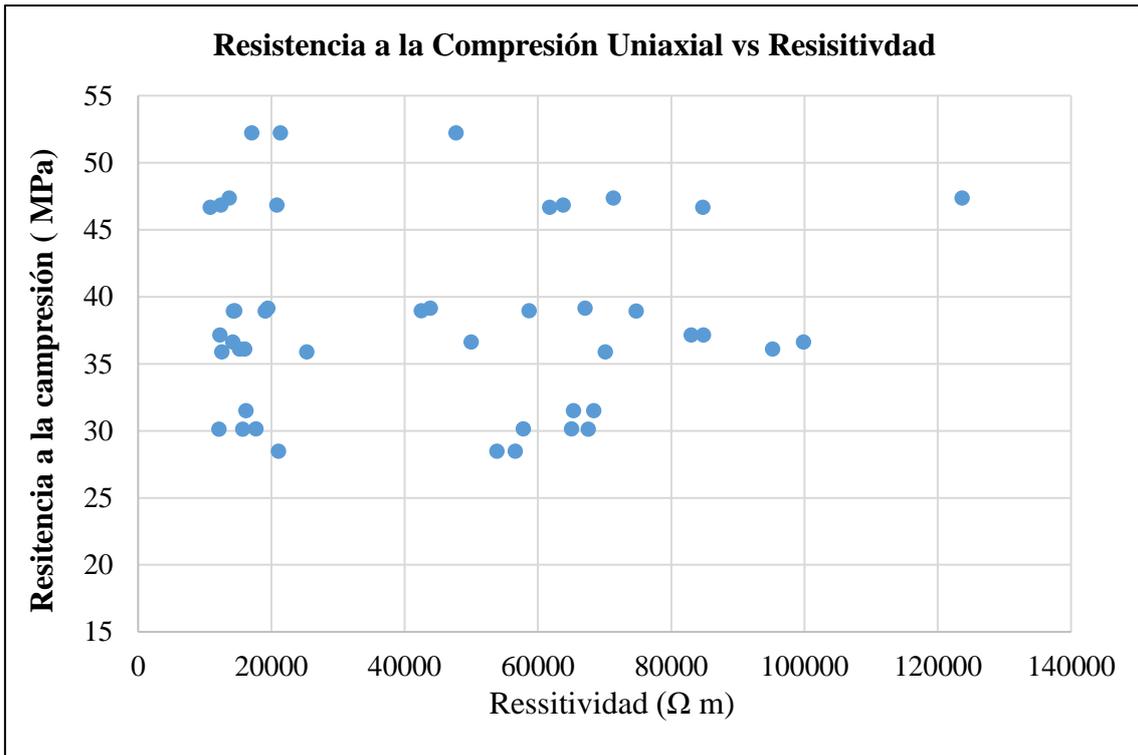


Figura 3.4 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas grandes- Pumayunga  
 Fuente: Autoría propia

Al igual que en la zona de Cojitambo se puede observar que los datos tienden a agruparse en dos zonas obteniendo un valor de RCU máximo y mínimo, en donde el límite de cada uno de estos valores estará determinado por la ecuación obtenida en base a los datos.

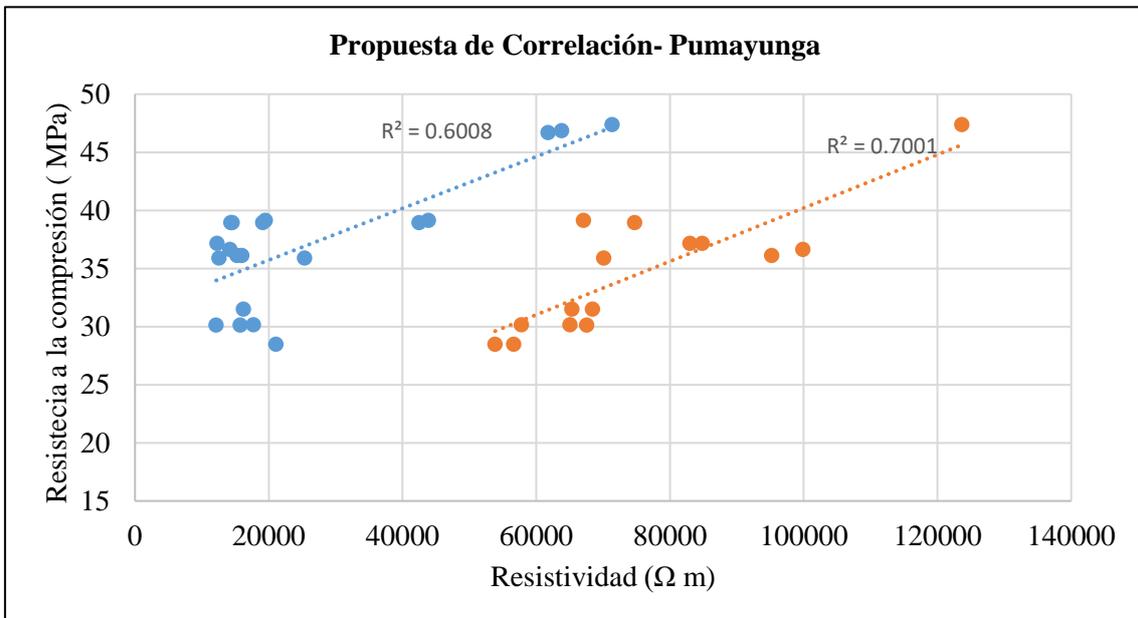


Figura 3.5 Correlación RCU Máxima y Mínima, probetas grandes- Pumayunga  
 Fuente: Autoría propia

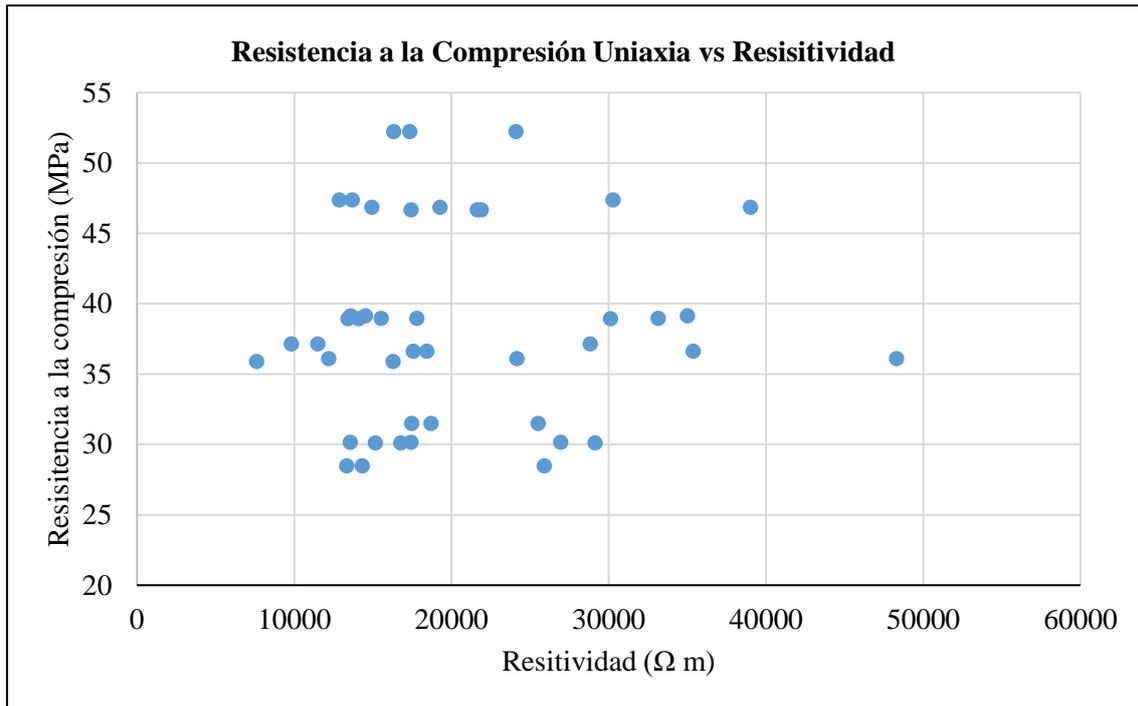


Figura 3.6 Gráfica RCU vs Resistividad eléctrica, probetas pequeñas – Pumayunga  
Fuente: Autoría propia

### 3.4 Interpretación y análisis de resultados obtenidos

Las correlaciones presentadas en las figuras 3.2- 3.5 han sido ajustadas linealmente, presentando así valores máximos y mínimos de RCU de una roca en función de los valores de la resistividad eléctrica de las mismas.

Las ecuaciones se presentan a continuación:

- **Cojitambo**

$$\text{RCU máx. (MPa)} = 0.0001R + 30.394$$

$$\text{RCU min. (MPa)} = 0.0001R + 12.926$$

- **Pumayunga**

$$\text{RCU máx. (MPa)} = 0.0002R + 31.274$$

$$\text{RCU min. (MPa)} = 0.0002R + 17.249$$

Analizando las gráficas se puede determinar que existe una correlación entre la RCU y las resistividades eléctricas de las rocas, misma que tiene un crecimiento proporcional a la presión ejercida en las probetas. Esta interpretación nos permite obtener una herramienta de análisis en el campo obteniendo valores aproximados de la RCU.

Con las probetas pequeñas tanto de zona de Cojitambo como de Pumayunga se puede observar que los datos no tienen a agruparse en zonas determinadas, por el contrario, se encuentran totalmente dispersos, por lo que, no es posible establecer una relación entre la resistividad y la resistencia a la compresión uniaxial.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- Una vez analizados los resultados obtenidos en la experimentación con las diferentes muestras, se reconoce como factible el procedimiento planteado para la determinación de la resistencia a la compresión uniaxial de las rocas en campo.
- Al analizar la tabla 3.5 se denota que los afloramientos de la zona de Cojitambo presentan resistencias entre 17 y 47 MPa, y en la zona de Pumayunga los valores están entre 28 y 52 MPa, lo cual conlleva a la deducción que si los valores de nuevas probetas de rocas a ser ensayadas no se encuentran dentro de estos rangos se trataría de otras formaciones geológicas.
- Según lo observado en las figuras 3.1 y 3.4 que corresponden a las probetas de mayor tamaño se logró determinar que las rocas aumentan su resistividad a medida que los valores de la resistencia a la compresión uniaxial aumenta, es decir existe una relación directamente proporcional entre estos valores. Lo que permitió obtener un límite máximo y mínimo en cada zona de estudio.
- En las figuras 3.3 y 3.6 se observó una total dispersión en los datos, lo que nos indica que este procedimiento no es aplicable en muestras con tamaños reducidos.
- La metodología aplicada en esta experimentación, nos permite conocer la resistencia a la compresión de la roca rápida y económica, generando una ventaja con respecto a las muestras enviadas al laboratorio, pues su determinación se la puede realizar en el campo.
- Esta investigación es necesaria en el área minera para el estudio geotécnico y comportamiento de los macizos rocosos, pues existen numerosas variables por resolver según las experiencias. La eficiencia del modelo planteado requiere de

una evolución en el tiempo, pues es necesario una profundización en el conocimiento de los diferentes materiales rocosos.

## **RECOMENDACIONES**

- En proyectos mineros es importante la determinación de la compresión de la roca, por lo que se recomienda enviar inicialmente las muestras al laboratorio para partir de datos reales y poder correlacionarlos.
- Se recomienda realizar esta experimentación en materiales metálicos, pues estos en su mayoría son considerados como conductores eléctricos, lo que puede generar una alteración en los resultados obtenidos.
- Es conveniente que las muestras a experimentar sean lo más homogéneas posibles, puesto que un cambio brusco en su estructura podría generar variaciones tanto en la determinación de la resistencia como de la resistividad.
- Es recomendable que el momento de determinar la resistividad de las muestras, estas sean sumergidas durante un mismo periodo de tiempo para cada probeta, pues el agua favorece el paso de corriente eléctrica, especialmente en rocas cuyos valores de resistividad son demasiados altos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Abanto, A., & Winter, I. (2018). *Modelo de permeabilidad mediante el sistema swips en perforaciones orientadas en el proyecto Cañariaco, Cañaris, Ferreñafe, Lambayeque( Tesis Pregrado)*. UNiversidad Nacional de Cajamarca, Faculta de Ingenieria , Cajamarca- Perú.
- Agasco, R. (2007). *Porpiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación*. Universidad de Granada, España.
- Alonso, F. (4 de Junio de 2013). *Propiedades físicas: densidad y porosidad*. Universidad de Oviedo, Departamento de Geología (Petrología y Geoquímica).
- Archie, G. E. (1952). *Classification of carbonate reservoir rocks and petrophysical* (Vol. 36). Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea*. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.
- Barrera, J., & Rugel, B. (2016). *Propuesta de implementación del software ni-multisim para mejorar el proceso de aprendizaje de los circuitos eléctricos en la asignatura de física (Tesis de Pregrado)*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Benavente, D. (2006). *Propiedades físicas y utilización de rocas ornamentales*. Universidad de Alicante , Departamneto de Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente .
- Benavente, D., Bernabéu, A. M., & Cañaveras, J. C. (1 de Enero de 2008). Estudio de las propiedades físicas de las rocas. *I2*(1).
- Da Silva, A. (2 de Agosto de 2012). *La Comunidad Petrolera* . Obtenido de Clasificación de la Porosidad : <https://www.lacomunidadpetrolera.com/2012/08/clasificacion-de-la-porosidad.html>
- Estrada, L. A. (31 de Agosto de 2015). *Cl Prospección Geolétrica GGu*. Obtenido de <https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Geoelectrica-para-Ingenieros.pdf>
- Fajardo, L. C. (6 de Agosto de 2015). Obtenido de <https://es.slideshare.net/LauraCristinaFajardo/tcnicas-para-la-evaluacin-de-la-porosidad-y-permeabilidad-de-las-rocas>
- Fernández, J., & Coronado, G. (s.f.). *Fiscalab*. Obtenido de Carga Eléctrica: <https://www.fiscalab.com/apartado/carga-electrica>
- Monge, L., & Ramírez, P. (2004). *Mecánica de Rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- Rodas Toral, R. A. (2019). *Tipificar los deslizamientos y valorar la susceptibilidad en sectores: Carmen del Guzho, Nulti, Universidad del Azuay, Sinincay sector pumayunga y Jadán cantón Cuenca ( Tesis Pregrado)*. Universidad del Azuay, Cuenca.

- Rojas, C. (2011). *Modelamiento geoestadística de los depósitos fluviales de la Zona C-Formación Mugrosa en el área La Cira-Este del Campo La Cira (Tesis de maestría)*. Universidad Nacional de Colombia, Geociencias, Bogotá-Colombia.
- Solana, M. (2014). *Comparación de técnicas Geofísicas para Determinación de Contaminación de Suelos Agrícolas ( Tesis de Pregrado)*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas , Departamento de Ingeniería Geológica.
- Steinmann, M. (1977). The Cuenca Basin of Souther Ecuador: tectonosedimentary ( Tesis PhD). *ETH Zurich*, 176.
- Toledo, T. (2013). *Selección de un Punto de Estudio para la Caracterización del Grado de Saturación en Agua de la Zona Vadosa. Aplicación en una Finca Experimental al Sureste de la Provincia de Madrid (Tesis de Pregrado)*. Universidad Politécnica de Madrid , Ingeniería Geológica .
- Velasco, H. (4 de Abril de 2013). *Física Biológica*. Obtenido de <http://www0.unsl.edu.ar/~cornette/Bolilla9.pdf>