

CAPITULO I

PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS.

I.1. Introducción.

Los métodos geoelectricos se basan en el análisis de la respuesta que el suelo ofrece a un estímulo eléctrico, inducido artificialmente o de origen natural; es por ello, que al aplicar dichos métodos se deben conocer las propiedades eléctricas de las rocas y de los minerales que componen el medio en estudio.

Cabe destacar que el comportamiento físico de las rocas depende tanto de las propiedades como del modo de agregación de sus minerales, la forma, volumen y relleno de los poros (Orellana, 1972).

Las corrientes eléctricas que se propagan a través de las rocas deben ser analizadas tomando en cuenta que éstas se encuentran en un medio tridimensional e isotropo. La ley de Ohm para medios homogéneos y tridimensionales es una de las leyes físicas que analizan el comportamiento de las corrientes eléctricas y plantea que la densidad de corriente (j) en un punto del medio tiene la misma dirección que el campo Eléctrico (E) en ese mismo punto y, que a su vez, son proporcionales (Ec. I.1). El factor de proporcionalidad es la conductividad (σ) o su inverso la resistividad (ρ).

$$\rho = \frac{E}{j} \quad (I.1)$$

Donde:

E = es el campo eléctrico.

j = es la densidad de corriente.

I.2. Resistividad Eléctrica.

Las propiedades electromagnéticas principales que caracterizan a las rocas son: la permeabilidad magnética, permitividad eléctrica y la resistividad eléctrica (o su inverso la conductividad eléctrica). De éstas, la más común y de útil aplicación en los estudios geoelectrónicos de bajas frecuencias, debido a la presencia de pocos minerales ferromagnéticos en las rocas (principalmente en las rocas sedimentarias), es la resistividad. La resistividad eléctrica específica ρ es la propiedad que presenta cualquier material, de oponerse al paso de una corriente eléctrica, siendo su expresión matemática:

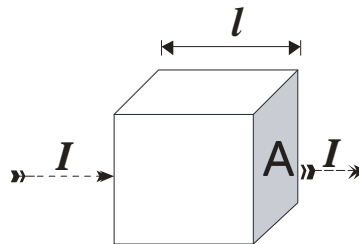
$$\rho = \frac{(R)(A)}{l} \quad (I.2)$$

donde: R es la resistencia del material.

A: Área del material.

l: Longitud del material.

I: Corriente eléctrica aplicada al material.



Es decir, la resistividad de un material es la resistencia eléctrica de un cubo de arista l de dicho material, cuando se hace pasar a través del mismo una corriente I perpendicular a una de sus caras; siendo en este caso $\rho=R$. Las unidades de la resistividad en el sistema M.K.S. es Ohm-m.

Por otro lado, se tiene que la resistividad posee una magnitud inversa la cual tiene como nombre conductividad eléctrica y se expresa como:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (I.3)$$

Sus dimensiones son: mhos/ m.

Existen diversos factores que intervienen en la variación de la resistividad. Gracias al conocimiento de estos factores es posible interpretar la variación de la resistividad en un medio estudiado con base en sus características.

I.3. Factores que intervienen en la resistividad.

Una roca se define como un agregado de minerales que contiene poros; los cuales pueden estar llenos de gases y/o fluidos. Los factores que intervienen en la variación de la resistividad eléctrica de este agregado son:

- a) Resistividad de los minerales que conforman la roca.
- b) Porosidad.
- c) Grado de humedad.
- d) Resistividad de los fluidos contenidos en los poros de las rocas.
- e) Doble Capa Eléctrica y Capacidad de Intercambio Catiónico.
- f) Temperatura.

I.3.1. Resistividad de los minerales que conforman la roca.

La resistividad de los minerales por lo general es muy alta en comparación con la resistividad de las rocas que los contienen, esto debido a la influencia de la porosidad, la humedad y la resistividad de los fluidos que rellenan los poros, en la resistividad de la roca. En la Tabla I.1 se muestran los rangos de valores comparativos de la resistividad de los minerales cuarzo y calcita, y de rocas que los contienen: arenas y calizas, respectivamente. Mientras que el cuarzo tiene un rango de resistividad entre 10^{12} y 10^{14} Ohm-m, la resistividad de las arenas, compuestas de cuarzo, pueden variar en el rango de 5 a 10^3 Ohm-m en dependencia de la resistividad del agua que la satura. Lo mismo sucede con la calcita, que tiene una resistividad en orden de magnitud entre 6 y 9 veces mayor que la roca caliza.

De esto se concluye que la influencia de los minerales que conforman la roca en su resistividad es limitada, siendo cada esta influencia cada vez menor en la medida que aumenta la porosidad y humedad de la roca.

Mineral	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Roca	Resistividad ($\Omega \cdot m$)
Cuarzo	$10^{12} - 10^{14}$	Arena seca	$10^3 - 10^4$
		Arenas con agua dulce	50 - 500
		Arenas con agua salada	0.5 - 5
Calcita	$10^8 - 10^{12}$	Caliza	$10^2 - 10^3$

Tabla I.1: Resistividad de la arena y caliza, así como de los minerales que las conforman.

I.3.2. Porosidad de la roca.

Una roca contiene, en mayor o menor medida, una serie de pequeños espacios ocupados por aire y/o fluidos llamados poros que pueden o no estar conectados entre sí. La porosidad P es el valor o porcentaje estimado para la cantidad presente de poros en una roca, respecto al volumen total de ésta.

$$P = V_{\text{poros}} / V_{\text{total}} \quad (\text{I.4})$$

donde: V_{poros} es el volumen presente de poros en la roca.

V_{total} es el volumen total de la roca.

Para el caso de la conductividad eléctrica, debemos tomar en cuenta la porosidad efectiva; es decir, cuando los poros de la roca están interconectados. Existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad de la roca y la resistividad eléctrica de la misma, dado por la resistividad de los fluidos que rellenan los poros. Un aumento en la porosidad de una roca conlleva a una disminución de la resistividad eléctrica.

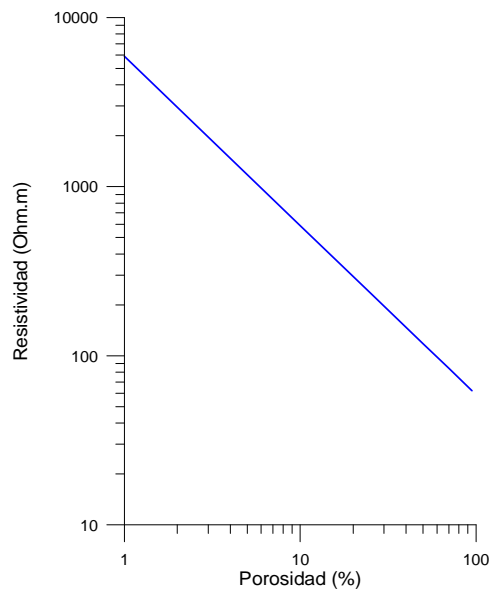


Figura I.1: Relación entre la resistividad y Porosidad de la roca, calculada para una muestra de arena con una salinidad de 0.1 g/l, 100% saturada a una temperatura de 20°C.

Teóricamente la relación entre la porosidad y la resistividad está demostrada por medio de la Ley de Archie (Archie, 1942), la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\rho_r = P^{-m} \cdot \rho_a \quad (\text{I.5})$$

Donde:

ρ_a : Es la resistividad del agua (generalmente oscila entre 1 y 100 $\Omega \cdot m$).

m: Es el factor de cementación (varía entre 1 y 2).

P: Es la porosidad de la roca (varía generalmente entre 10 y 60%).

I.3.2.1 Anisotropía de la rocas.

En algunos casos los poros de la roca se alinean con cierta dirección preferencial debido a esfuerzos a los que ha sido sometida la roca. Estos esfuerzos pueden acomodar los poros, o generar porosidad secundaria, como por ejemplo ocurre en las rocas fracturadas; en estos casos se presenta la anisotropía, lo que significa que la resistividad medida depende de la dirección en que fluye la corriente. Si los poros se encuentran distribuidos uniformemente en la roca ésta es isótropa, por lo que la resistividad será la misma independientemente de la dirección en que sea medida (Fig. I.2).

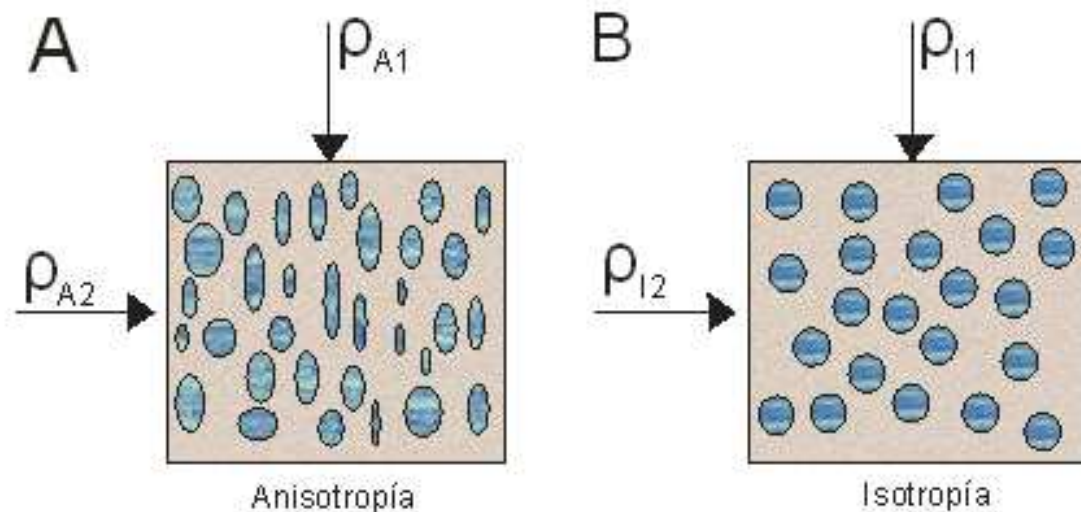


Figura I.2: A) Poros orientados, la resistividad ρ_{A1} es menor que la resistividad ρ_{A2} . B) Poros sin orientar, la resistividad ρ_{A1} es igual a la resistividad ρ_{A2} .

Es necesario aclarar que cuando en los métodos geoelectrónicos se menciona el concepto de anisotropía, comúnmente se refiere a otro tipo de anisotropía denominado macroanisotropía, la cual está relacionada con la intercalación de capas de un mismo tipo de roca con diferentes valores de resistividad (ver Tabla I.2).

Según Keller, 1996, Parkhomenko, 1967		Según A.A. Ogilvi	
Hulla	1.7	Roca	λ
Esquistos	1.40 – 2.30	Arcilla poco laminada	1.05 – 1.10
Antracita	2.0 – 2.6	Arcilla con intercalaciones de arena	1.10 – 1.25
Pizarras grafitosas	2 – 2.8	Carbón negro	1.30 – 2.50
		Grafito y Pizarra carbonosa	2.00 – 2.00
		Caliza monolítica	1.05 – 1.30
		Rocas fracturadas	1.10 – 4.00

Tabla I.2: Valores típicos del coeficiente de anisotropía λ .

I.3.3. Grado de humedad de la roca.

El grado de humedad se define como el cociente entre el volumen de agua contenida en la roca y el volumen de los poros de la misma. Dicho cociente es variable entre 0% y 100% (saturación completa). Este factor juega un papel importante en la variación de la resistividad eléctrica, existiendo una relación inversamente proporcional entre el grado de humedad de la roca y su resistividad (Fig. I.3). Para un mismo tipo de roca, si se aumenta la humedad disminuye su resistividad, y viceversa. La ecuación de Archie (I.5) expresa la relación entre la resistividad de la roca con su porosidad para una saturación del 100%. Sin embargo existen casos en los que la roca no está saturada al 100% con agua; es decir, algunos de sus poros contienen aire u otro tipo de fluido. A partir de lo anterior, es necesario introducir el índice de resistividad I, que se define como la relación entre la resistividad de la roca con el grado de saturación. A su vez, el grado de saturación S es la fracción de la roca ocupada por el agua con respecto a su volumen total de poros. Según Archie y Guyod, el índice de resistividad puede expresarse de la forma (Orellana, 1972):

$$I = S^{-n} \tag{I.6}$$

donde $n=2$ (Archie) o $n=1.98$ (Guyod); por lo que podemos expresar la relación entre la resistividad de la roca y el grado de humedad de la misma como una derivación de la ecuación de Archie:

$$\rho_r = P^{-m} \cdot S^{-n} \rho_a \tag{I.7}$$

donde: P^m es el factor de formación.

S^{-n} es el índice de resistividad.

ρ_a es la resistividad aparente.

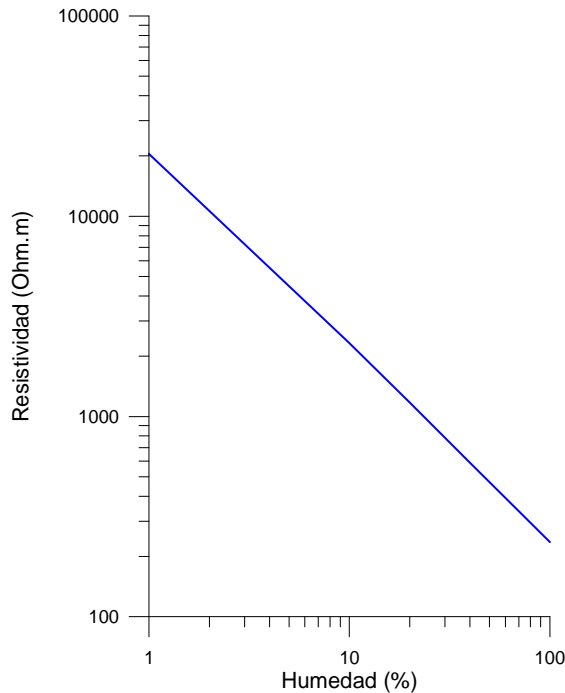


Figura I.3: Relación entre la resistividad de la roca y su humedad determinada para una muestra con 25% de porosidad y saturación total con agua de salinidad 0.1 g/l, a una temperatura de 20°C.

I.3.4. Resistividad de los fluidos contenidos en los poros.

Dentro de la teoría de electrolitos éstos son divididos en dos grupos: electrolitos fuertes y débiles, lo cual influye en la conductividad que presenta el fluido. Aquellos fluidos que contienen electrolitos fuertes son mejores conductores de la electricidad que los que contienen electrolitos débiles. Los ácidos y bases fuertes, así como la mayoría de las sales inorgánicas forman electrolitos fuertes.

La movilidad de iones V , se define como la velocidad de un ion sometido a una diferencia de potencial de 1[V]; por lo que sus unidades son: $[m^2/s \cdot V]$.

En la Tabla I.3 se muestra la movilidad de algunos iones en solución acuosa. Este parámetro determina la conductividad al aumentar la velocidad de los iones en la solución, aunque la variación de la conductividad es muy pequeña cuando se cambia el tipo de sal en la solución.

Catión	$V, m^2/(s \cdot V)$	Anión	$V, m^2/(s \cdot V)$
H^+	$32.63 \cdot 10^{-8}$	OH^-	$18.0 \cdot 10^{-8}$
K^+	$6.69 \cdot 10^{-8}$	Cl^-	$6.8 \cdot 10^{-8}$
Na^+	$4.5 \cdot 10^{-8}$	NO_3^-	$6.2 \cdot 10^{-8}$
Ag^+	$5.6 \cdot 10^{-8}$	SO_4^-	$6.8 \cdot 10^{-8}$
Zn^{++}	$4.8 \cdot 10^{-8}$	CO_3^-	$6.2 \cdot 10^{-8}$
Fe^{+++}	$4.6 \cdot 10^{-8}$		
Mg^{++}	$4.8 \cdot 10^{-8}$		

Tabla I.3: Movilidad de iones en solución acuosa a 18°C.

El subsuelo puede estar saturado por diversos fluidos que contienen diferentes tipos de sales, siendo las más frecuentes el Cloruro de Sodio (NaCl) y el Cloruro de Potasio (KCl). Dichos fluidos con sales rellenan los poros de la roca originando un amplio rango de variación de la resistividad eléctrica del suelo. La resistividad del agua contenida en los poros de la roca es inversamente proporcional a la concentración de sales disueltas. (Figura I.4). Por ejemplo, si se tienen dos muestras del mismo tipo de arena, una saturada con agua dulce ($\rho_w = 20 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, $C = 0.3 \text{ g/l}$) y otra con agua salinizada ($\rho_w = 11 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$, $C = 2 \text{ g/l}$) se tendrían valores de resistividad eléctrica de 78 Ohm.m y 11 Ohm.m, respectivamente.

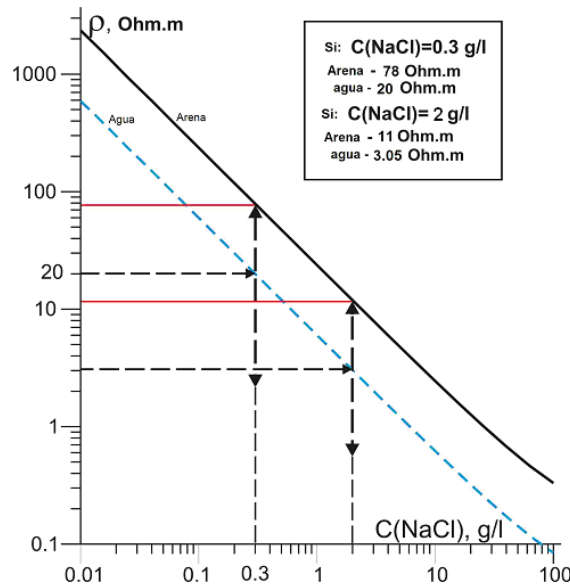


Figura I.4: Resistividad de una solución de NaCl y de una muestra de arena con porosidad de 25% y saturada 100% con dicha solución a una temperatura de 20°C.

I.3.5. Doble Capa Eléctrica y Capacidad de Intercambio Catiónico.

Existen diversos procesos químicos en las rocas que afectan los valores de resistividad de los mismos; siendo los más importantes los que a continuación se describen:

Doble Capa Eléctrica. (DCE).

Es un fenómeno que ocurre al entrar en contacto la parte sólida de la roca con el fluido o solución presente dentro de la misma. Al establecer dicho contacto entre ambas fases, se genera una diferencia de potencial que origina la atracción entre los iones contenidos en la solución y los iones presentes en la fase sólida, generando una nube de cargas eléctricas próximas a la interfase, originándose una DCE.

G. Gouy (1910) y D.L.Chapman (1913) consideraron que la DCE se puede dividir en dos capas (Fig. I.5): la capa de Helmholtz que se encuentra en la parte sólida y cuyo espesor es igual al tamaño de un ión, y la segunda capa se conoce como la capa de Gouy; donde la concentración de iones es mayor que en el resto de la solución y su tamaño varía entre algunos nanómetros y micrómetros, dependiendo de la composición de la solución y las características de la roca.

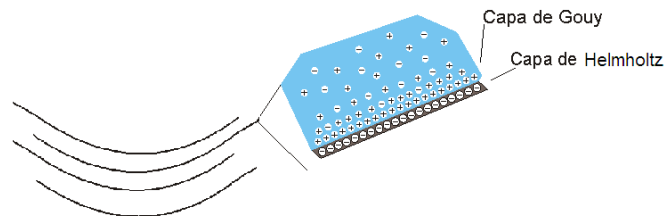


Figura I.5: Representación de las capas de Helmholtz y Gouy.

Este fenómeno afecta grandemente a las arcillas debido a las propiedades de sus minerales y el diámetro de sus capilares (Fig. I.6); es por ello que existen diversos tipos de arcillas las cuales poseen diferentes tipos de minerales y capilares, y por lo tanto diferentes magnitudes de la DCE.

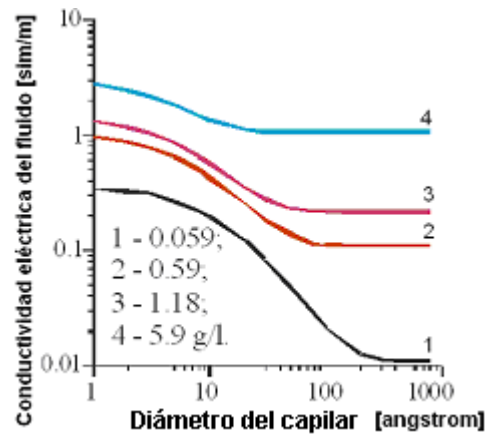


Figura I.6: Relación entre la conductividad eléctrica, el diámetro capilar y diferentes concentraciones de sales, para una solución de NaCl.

Otro factor que se considera es la salinidad del fluido que rellena los poros de la roca (Fig. I.6), siendo que el espesor de la DCE disminuye conforme la salinidad aumenta, como se aprecia en la Tabla I.4. Cuando la salinidad es alta (mayor a 10 g/l) la influencia de la DCE es despreciable y el contraste de resistividad entre arena y arcilla disminuye considerablemente.

Concentración de sal en g/l	Espesor de la doble capa eléctrica [Å]
0.1	74.4
1	23.,5
10	7.44
100	2.35

Tabla I.4: Espesor de la DCE en una solución de NaCl.

Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

La CIC se define como la capacidad que poseen las rocas de retener o intercambiar cationes entre el tipo de solución que contiene la roca y la superficie sólida de la misma. Ciertos tipos de suelos presentan partículas de arcilla y materia orgánica, las cuales están cargadas negativamente, atrayendo a los cationes que predominan en el suelo. Por ejemplo, el Calcio, Aluminio, Magnesio, Potasio, Sodio e Hidrógeno. El intercambio catión-anión se realiza de acuerdo al tipo de catión hasta lograr un equilibrio entre la concentración de iones contenidos en la solución y los que se encuentran en fase sólida. Dicho equilibrio, está regido por el tipo

de ión, el tipo de solución y el pH. Finalmente, dicho intercambio sólo se logra en suelos que contienen arenas ricas en sulfuros y arcillas, así como suelos ricos en materia orgánica.

El intercambio genera una disminución en los valores de resistividad para los tipos de suelo antes mencionados, siendo las unidades de medición de la CIC en masas equivalentes por cada 100 gramos de suelo (meq/100 g). Por ejemplo, el rango normal de CIC en suelos debe ser desde < 4 meq/100g para suelos arenosos bajos en arcilla y > 25 meq/100g para suelos con alto contenido en ciertos tipos de arcilla.

La siguiente Tabla muestra diferentes materiales y su valor de CIC.

Material	CIC, meq/100 g
Materia Orgánica	130-500
Ilita	10-40
Kaolinita	3-15
Arena fina	0.8
Arena	1 -4
Arena arcillosa	2 - 12
Arcilla arenosa	7 - 16

Tabla I.5: CIC para diferentes materiales.

I.3.6. Temperatura.

La resistividad del fluido o electrólito contenido en la roca depende de la temperatura, es decir, a baja temperatura aumenta la resistividad del fluido y viceversa. Por ello, cuando se realizan mediciones de resistividad de agua a diferentes temperaturas, es necesario corregir los valores a una misma temperatura de referencia, obteniendo sólo las reacciones que se originan por las diferencias entre salinidad y no por temperatura. Debido a esto, existen varios autores que han determinado diversas fórmulas para corregir los valores de resistividad afectados por la variación de la temperatura, con el objetivo de obtener mediciones precisas de resistividad en laboratorio, y así una correcta modelación petrofísica.