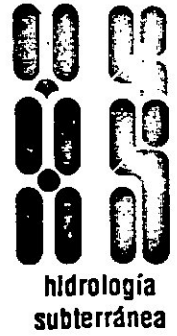
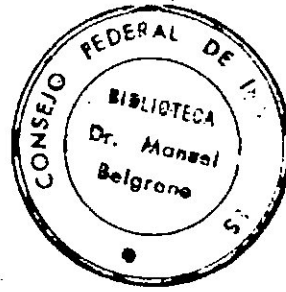


34626

1785



# METODOS APLICADOS A HIDROLOGIA SUBTERRANEA

PROSPECCION GEOELECTRICA  
ANALISIS MULTIVARIADO  
GEOESTADISTICA

LA PLATA - DICIEMBRE DE 1990

0x12

H22213  
B32



CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES

Segundas Jornadas de Actualización  
en Hidrología Subterránea

**Introducción a la Prospección Geoeléctrica  
Aplicada en Geohidrología**

CALVETTY AMBONI, Boris

RAPACCINI, Alicia

**La Plata**

**1990**

**PROSPECCION GEOELECTRICA  
Y SU APLICACION A LOS ESTUDIOS GEOHIDROLOGICOS DEL CFI**

**INTRODUCCION**

En las páginas siguientes se exponen en breve detalle los principios y técnicas de cálculo a los que se ajusta la metodología aplicada en las mediciones geoelectricas por los geofísicos del Consejo Federal de Inversiones.

Los métodos empleados, preponderantemente en exploraciones geohidrológicas, son los de Sondeo Electrico Vertical (SEV) y en menor medida el de Calicatas Eléctricas (CE), con aplicación excluyente de la configuración electródica de Schlumberger.

Por consiguiente la exposición se limita a una enunciación de conceptos generales, a la descripción de la práctica de los métodos SEV y CE y a las técnicas de interpretación adoptadas. Como complemento, en un anexo, se resumen los numerosos trabajos con aplicación de estos métodos realizados desde 1977 a la fecha, incluyendo los realizados por convenios de cooperación horizontal.

De tal manera, solo se pretende aqui introducir al estudio de los métodos de Prospección Geoelectrica, dando los elementos que se consideran indispensables para su utilización, además de difundir las ventajas de la aplicación de tales técnicas geofísicas en la exploración geohidrológica.

## 1. CONCEPTOS GENERALES

### PROSPECCION GEOFISICA

Sin intentar una definición estricta, puede decirse que Prospección Geofísica es la investigación de la parte superior de la corteza terrestre con fines utilitarios mediante la aplicación de métodos físicos y matemáticos.

Sus principios de aplicación se basan en la variabilidad de las propiedades físicas de las rocas como ser: conductividad, elasticidad, susceptibilidad magnética, radiactividad, etc. Cada una de ellas da lugar a un método de características diferentes, cuya clasificación exhaustiva se omite, indicándose tan solo que pueden ser agrupados en: Magnéticos, Gravimétricos, Sísmicos, Eléctricos, Radiactivos y Térmicos.

### PROSPECCION ELECTRICA

Aunque el desarrollo de los métodos eléctricos es relativamente reciente, sus orígenes deben rastrearse hasta mediados del siglo XVIII, cuando Watson descubre la conductividad del suelo, o a comienzos del siglo XIX, cuando el inglés Fox descubre el fenómeno del Potencial Espontáneo y sugiere su aplicación en la prospección minera.

No obstante, su más importante avance y diversificación se da en el presente siglo. En gran medida, a partir de las investigaciones de Conrad Schlumberger, quien en 1913 realiza dos importantes experimentos: En el primero, mediante mediciones del potencial espontáneo, descubre un yacimiento de sulfuros en Bor (Servia, Yugoslavia). En el segundo, aplicando corriente artificial, estudia una cuenca silúrica en Calvados (Francia).

El rápido perfeccionamiento de estos y otros métodos estuvo ligado hasta la década del 30, a este ingeniero de minas alsa-

ciano quien, con su hermano Marcel; el matemático rumano Stefanescu y el físico francés Maillet, trabajó en su desenvolvimiento, no solo en su faz práctica sino que, investigando las condiciones de la propagación de la corriente eléctrica en medios estratificados, dotó a los mismos del indispensable sustentamiento teórico. Esta última cuestión fue descuidada por muchos investigadores que, especulando exclusivamente con eventuales logros experimentales, arribaron a conclusiones erróneas que cobraron amplia difusión merced a la sencillez de su aplicación, perjudicando notoriamente el desarrollo de estos métodos.

Siguiendo el camino de Schlumberger, identificado con la escuela francesa, son enormes los avances logrados con posterioridad, merced a la dedicación de numerosos investigadores y a los adelantos tecnológicos, los que permitieron su enriquecimiento y diversificación.

#### CLASIFICACION DE LOS METODOS ELECTRICOS

Entre los métodos de prospección eléctrica pueden diferenciarse, en primera instancia, aquellos que exploran campos naturales preexistentes de los que requieren una fuente de energía artificial, y entre éstos, los que utilizan campos constantes (corriente continua) de los que lo hacen con campos variables. Tal como lo muestra Orellana (1982) en el siguiente cuadro:

##### A. Metodos de campo natural:

- 1.- Potencial Espontáneo
- 2.- Corrientes Telúricas
- 3.- Magneto - telúrico
- 4.- AFMAG

##### B. Metodos de campo artificial:

- B.1. de campo constante

- 1.- Líneas equipotenciales y del cuerpo cargado
- 2.- Sondeos Eléctricos.
- 3.- Calicatas eléctricas

#### B.2. de campo variable

- 1.- de frecuencia
- 2.- por establecimiento de campo
- 3.- Calicatas electromagnéticas
- 4.- de radiografía hertziana

#### B.3. Polarización inducida

### APLICACIONES

Los métodos eléctricos proporcionan información del subsuelo que puede ser utilizada con fines muy variados. Los más importantes son los siguientes:

- Investigaciones tectónicas para la búsqueda de petróleo
- Estudios para la localización de aguas subterráneas
- Estudio de cuencas carboníferas
- Detección de yacimientos de menas metálicas
- Investigaciones de basamento para cimentaciones
- Detección de zonas de fuga en embalses
- Investigaciones a profundidad muy reducida en estudios arqueológicos
- Estudios complementarios para cartografía de suelos
- Estudios de zonas muy profundas de la corteza terrestre.

### RESISTIVIDAD DE LAS ROCAS

Dado un conductor cualquiera, se denomina corriente eléctrica a todo desplazamiento ordenado de cargas libres. Esta será continua si su sentido e intensidad no varían con el tiempo. En estas

condiciones, una corriente  $I$  que atraviesa una superficie  $S$ , establecerá una densidad de corriente dada por:

$$J = I \cdot S^{-1} \quad (1)$$

relacionada con el campo eléctrico  $E$  mediante la ley de Ohm:

$$J = \sigma \cdot E = \rho^{-1} E \quad (2)$$

donde  $\sigma$  y  $\rho$  representan la conductividad y la resistividad del conductor, respectivamente. Magnitudes físicas de gran amplitud de variación, debido a la diversidad de formas de conducción, que dependen de la naturaleza del cuerpo considerado.

Los minerales que constituyen las rocas son en general malos conductores de la electricidad, por lo que las propiedades conductivas de estas se deben a que presentan una gran proporción de vacíos o poros con algún contenido de agua intersticial, agua que a su vez tiene sales en solución que la hacen iónicamente conductora. En consecuencia, son muchos los factores que intervienen en la caracterización resistiva de una roca: forma y distribución de los poros, grado de saturación, naturaleza y concentración del electrolito, temperatura, etc. Esto hace imposible atribuir a cada variedad una determinada resistividad, aunque sí, un margen de variación que en casi todos los casos es bastante amplio, como puede apreciarse en la figura 1.

Suponiendo la saturación de una porción de roca, es decir, que todos sus poros se encuentran ocupados por algún fluido, su resistividad,  $\rho_s$ , será función de su porosidad,  $p$ , y de la resistividad del fluido,  $\rho_v$ , según la siguiente relación:

$$\rho_s = ap^{-m} \rho_v \quad (3)$$

donde  $m$  depende principalmente del grado de cementación de la roca, variando entre 1.3 para rocas no cementadas y 2.3 para rocas

	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
MINERALES																								
Y ROCAS																								
Metales																								
Calcopirita																								
Pirrotita																								
Pirita																								
Magnetita																								
Galena																								
Grafito																								
Blenda																								
Feldespatos																								
Azufre																								
Cuarzo																								
Micas																								
Ígneas																								
Metamórficas																								
Anhidrita y																								
Sal Gema																								
Areniscas																								
Calizas																								
Dolomías																								
Gravas																								
Arenas																								
Margas																								
Limos																								
Arcillas																								
Agua de mar																								
Agua dulce																								

FIGURA 1- Resistividad de algunas rocas y minerales  
Modificado de Orellana (1982)



porosas de elevada cementación. El valor de  $a$  varía entre 0.5 y 1.5 y depende de la textura de la roca. Para rocas sedimentarias y cuando no se dispone de datos previos, suele utilizarse en primera aproximación:  $a = 1$ ,  $m = 2$ .

En general:

$$\rho_s = F\rho_v \quad (4)$$

donde el coeficiente  $F$  se denomina Factor de formación.

Para rocas no saturadas, habrá que considerar un índice de saturación  $\psi = bs^{-n}$ , donde  $b$  y  $n$  son constantes a determinar y  $s$  el grado de saturación. Como  $b \cong 1$ ,  $n \cong 2$ , en el caso más general

$$\rho_r = (ps)^{-2}\rho_v \quad (5)$$

proporcionará un valor aproximado.

#### FORMULAS Y DISPOSITIVOS EN LOS METODOS DE CORRIENTE CONTINUA

Los principios que rigen la práctica de estos métodos se basan en las leyes de la circulación de la corriente eléctrica en medios isótropos. Una idea sucinta de estos principios puede exponerse suponiendo que el terreno en el que se van a efectuar las mediciones es un medio homogéneo e isótropo, de resistividad  $\rho$ , separado por un plano horizontal de un semiespacio de resistividad infinita que representa a la atmósfera (figura 2).

Aplicando un potencial eléctrico entre dos puntos A y B de este plano, se produce, a través del medio isótropo, la circulación de corriente eléctrica,  $I$ , cuya densidad de corriente,  $J$ , en cada punto del medio es proporcional al campo eléctrico,  $E$ , provocado en dicho punto:

$$J = \rho^{-1}E \quad (6)$$

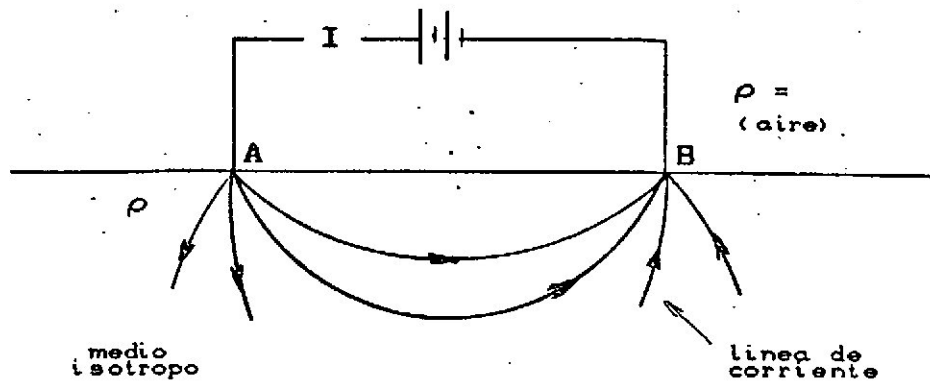


FIGURA 2- Circulación de la corriente en un medio isótropo de resistividad  $\rho$

En caso de ubicar el electrodo A lo suficientemente alejado del B (electrodo B en infinito), las líneas de corriente en las proximidades de A serán radiales y divergentes (figura 3). En consecuencia, las superficies equipotenciales serán semiesféricas y el campo eléctrico  $E$  en cada una de ellas estará dado por:

$$E = \frac{\rho I}{2\pi} r^{-2} \quad (7)$$

donde  $I$  es la corriente que penetra en el terreno por A y  $r$  representa el radio de la superficie semiesférica de referencia.

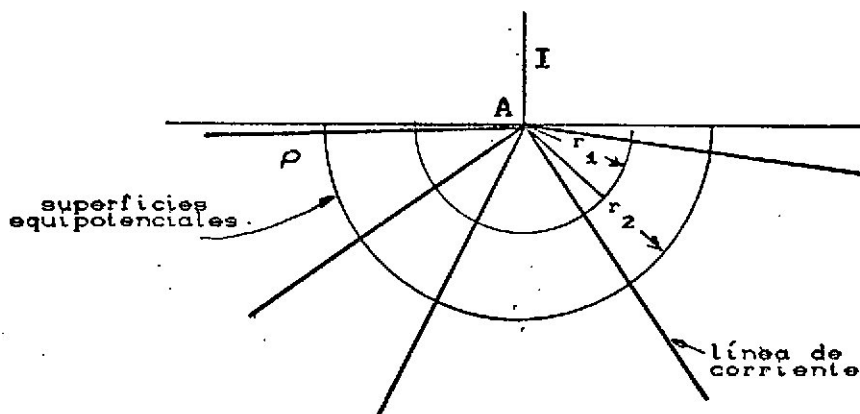


FIGURA 3- Líneas de corriente y superficies equipotenciales en las proximidades del electrodo A

Partiendo de la ec. 7, es posible calcular la diferencia de potencial,  $\Delta V$ , entre dos de dichas superficies, de radios  $r_1$  y  $r_2$

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{\rho I}{2\pi} (r_1^{-1} - r_2^{-1}) \quad (8)$$

donde  $V_1$  es el potencial a la distancia  $r_1$  de A, o lo que es equivalente, el potencial de la semiesfera de radio  $r_1$ .

De esta fórmula puede despejarse el valor de  $\rho$ , resistividad del medio isótropo, en función de  $I$  y  $\Delta V$  que pueden ser medidos sobre la superficie plana:

$$\rho = 2\pi \frac{1}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (9)$$

Donde  $K$  se denomina constante geométrica por su dependencia estricta de las condiciones geométricas del dispositivo empleado, siendo sus dimensiones las de una distancia.

En condiciones reales, el subsuelo no es precisamente homogéneo ni isótropo, por lo que el valor obtenido aplicando la fórmula anterior, corresponderá a una integración de los valores reales implicados en la medición y dependerá también de las posiciones relativas de las tomas de tierra que posibilitan la energización del terreno, puntos A y B, y la medición de  $\Delta V$ , puntos M y N. Por esta razón, lo que habitualmente se obtiene es una resistividad aparente,  $\rho_a$ , la que puede definirse como la resistividad que tendría un medio homogéneo en el que, al aplicar una corriente  $I$  entre electrodos de emisión, se observaría la misma diferencia de potencial entre los electrodos de medición que en el medio heterogéneo.

Para la obtención de este parámetro, se utilizan dispositivos cuya forma general se muestra en la figura 4:

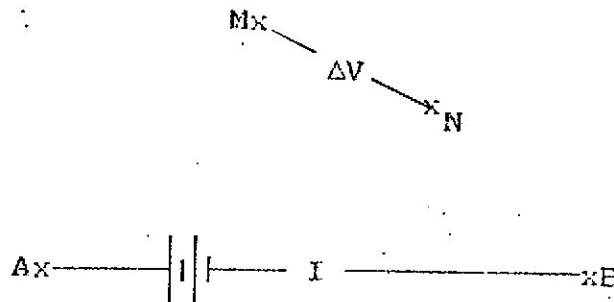


FIGURA 4- Dispositivo general para mediciones de la resistividad aparente (en planta)

En cuyo caso:

$$\rho_a = 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad (10)$$

En la práctica, los dispositivos más usuales pueden diferenciarse entre lineales y dipolares.

#### DISPOSITIVOS LINEALES

Los electrodos de medición se disponen sobre una línea, siendo los más difundidos los conocidos con los nombres de Schlumberger y Wenner:

##### a) Configuración Schlumberger

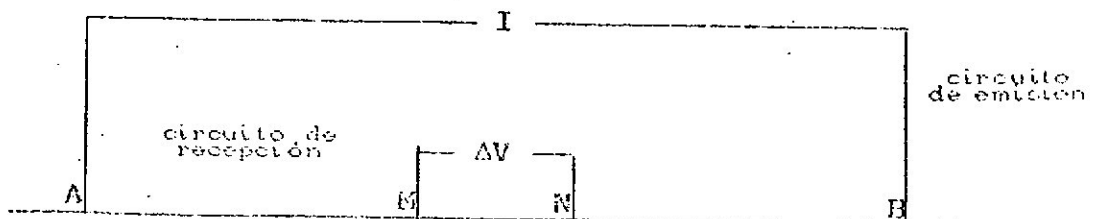


FIGURA 5

es un dispositivo simétrico que debe cumplir con la condición de que MN deba ser menor, a lo sumo igual, que AB/5. Los valores de resistividad aparente se grafican en función de AB/2. La constante geométrica es:

$$K = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \quad (11)$$

b) Configuración Wenner

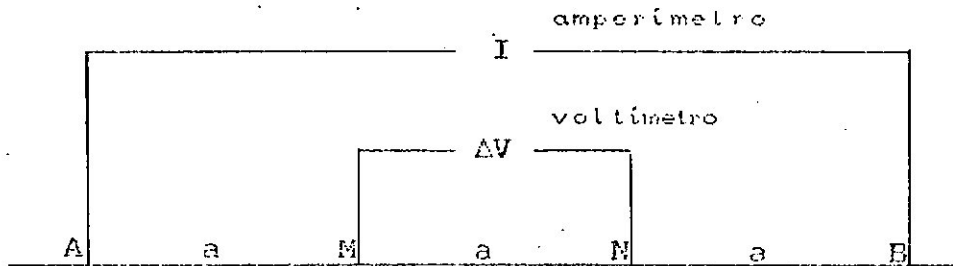


FIGURA 6

también simétrico y en el que los electrodos deben mantenerse equiespaciados. Los valores de resistividad aparente se grafican en función de  $a = AM = MN = NB$ . La constante geométrica es:

$$K = 2\pi a \quad (12)$$

c) Configuraciones trielectrónicas

Son variaciones de las dos anteriores y resultan de colocar uno de los electrodos de corriente lo suficientemente alejado del centro del dispositivo como para que no influya sobre los valores del potencial (electrodo en infinito). La constante geométrica es la del dispositivo base multiplicada por 2.

8.-DISPOSITIVOS DIPOLARES:

En este tipo de configuraciones, los pares AB y MN se hallan lo suficientemente separados como para suponer que cada uno de ellos constituye un dipolo. En principio, la posición del dipolo

de recepción MW respecto del de emisión AB, puede ser cualquiera.

En la práctica, se utilizan los de la figura siguiente:

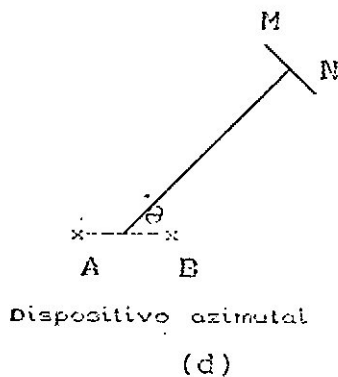
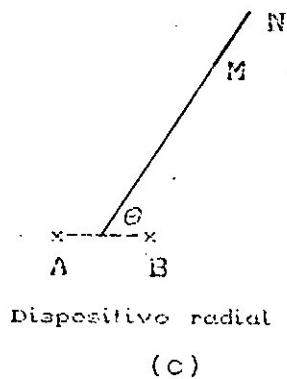
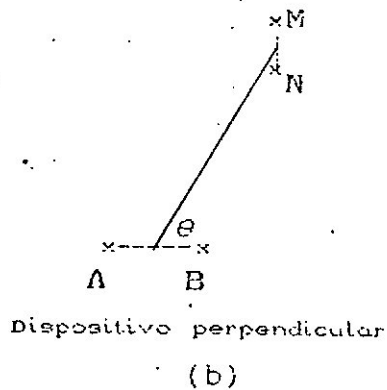
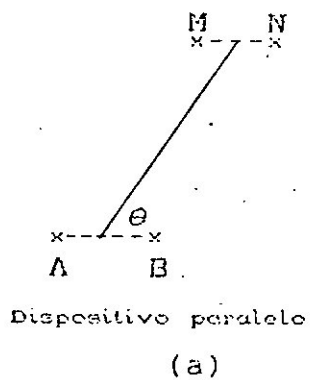


FIGURA 7- Disposición de electrodos en los dispositivos dipolares

## 2. EL METODO DE SONDEO ELECTRICO VERTICAL

Se denomina Sondeo Electrico Vertical (SEV), a una serie de mediciones de la resistividad aparente efectuadas con un dispositivo de azimut y centro fijos y separación creciente entre electrodos de emisión. Los dispositivos que cumplen con estas características son los de Wenner y Schlumberger.

Como en cualquier dispositivo eléctrico, la resistividad aparente se calcula mediante una fórmula del tipo

$$\rho_a = K(\Delta V/I) \quad (13)$$

La finalidad del SEV es la determinación de un modelo de la variación en profundidad de la resistividad del subsuelo, a partir de mediciones en superficie.

La necesidad de energizar el terreno, medir la corriente que circula y el potencial provocado, requiere la materialización de dos circuitos eléctricos independientes entre sí, denominados de corriente o emisión y de potencial o recepción, respectivamente, tal como se muestra esquemáticamente en las figuras 5 y 6.

**Circuito de emisión:** Incluye una fuente de poder, un amperímetro, electrodos de corriente y cable.

En las mediciones rutinarias del CFI se utiliza como fuente de energía una batería de acumuladores de 12 V en serie con un convertidor de 250 W de potencia. La tensión de salida varía entre unos pocos voltios y algunos centenares de voltios.

Los amperímetros empleados permiten mediciones de hasta 10 A, con una precisión del 1 % y resolución de 0.1 mA en el menor alcance. La lectura es digital, con indicador numérico de 3 $\frac{1}{2}$  dígitos e indicador de polaridad. Se alimenta con una batería común de 9 V.