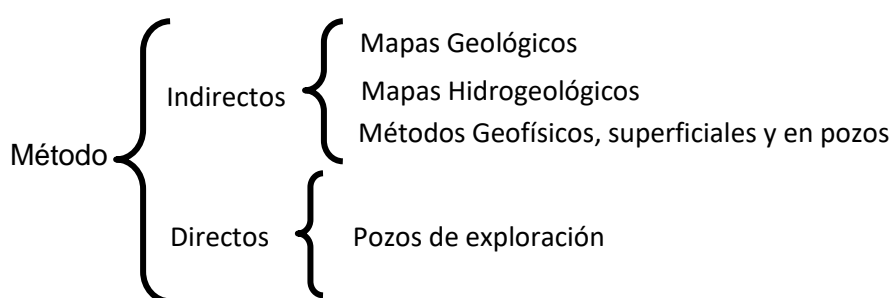


FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 1 de 19 hojas

UNIDAD 5: EXPLORACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

1 Introducción

Exploración o prospección son términos similares que significan búsqueda y en relación a la Hidrogeología, se refieren a la ubicación de reservorios de agua subterránea con características que a priori resulten apropiadas para una posterior explotación o aprovechamiento del recurso. Los métodos de exploración hidrogeológica se pueden clasificar en forma general, como aquellos que emplean técnicas de aplicación directa o indirecta.



Sin embargo, como las perforaciones de exploración son costosas, en general el número de las mismas es limitado y el resultado de la exploración puede no ser representativo de las condiciones del lugar; además en muchos casos examinar un sitio con el detalle adecuado requeriría un número muy grande, difícilmente alcanzable, de perforaciones.

Es así que se utilizan, en primera instancia o complementariamente, métodos de prospección geofísicos.

En general los datos obtenidos de perforaciones son de tipo puntual y corresponden a profundidades discretas; la información aportada por métodos geofísicos, en cambio refleja un volumen mucho mayor del subsuelo, produciendo una "imagen promedio" de las condiciones del mismo.

Este aspecto de las mediciones geofísicas tiene tanto ventajas como desventajas. Una ventaja es que un volumen mayor del subsuelo es representado con cada medición; una desventaja es que si un rasgo es muy pequeño puede no ser detectado en este volumen grande.

Así en la práctica se logra una compensación entre los dos métodos: por un lado la posibilidad de obtener una mejor resolución usando la investigación directa mediante perforaciones, y por otro lado los resultados más representativos provistos por las mediciones indirectas de la geofísica.

Cuando son combinados de manera adecuada, los dos métodos se complementan mutuamente para producir una provechosa investigación del subsuelo, usando los

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 2 de 19 hojas

métodos geofísicos para localizar zonas favorables y desfavorables y luego concentrando las perforaciones en las áreas críticas.

Existen tres vías básicas de aplicar los métodos geofísicos de exploración, a saber:

- Aérea o satelital, cuyo mérito principal reside en la gran cobertura espacial y los costos relativamente bajos, pero tiene una pobre, casi ninguna, resolución de detalles locales.
- Los aplicados en superficie, que producen una menor cobertura espacial por unidad de tiempo pero incrementan significativamente la resolución de la información del subsuelo; una limitación inherente a todos los métodos geofísicos de superficie es que su resolución (capacidad de detectar rasgos pequeños) decrece con la profundidad.
- Los registros bajo superficie, es decir en perforaciones, mejoran enormemente la resolución vertical con respecto a los anteriores, pero el volumen abarcado es usualmente limitado al área inmediatamente alrededor de la perforación o al existente entre dos perforaciones, y el costo por unidad de superficie es alto; su mayor beneficio es que permiten obtener información detallada de alta resolución a profundidades considerables y precisas.

Las tres vías de aplicación tienen su utilidad en la exploración del subsuelo, pero la primera solamente para estudios regionales de grandes unidades y con poco detalle. Los métodos geofísicos de exploración se emplean tanto antes como durante la ejecución de perforaciones, a fin de obtener información sobre el carácter de las formaciones y la presencia y la salinidad del agua subterránea. La eficacia de cualquiera de los métodos, sean de superficie o de perforaciones, depende del contraste en las propiedades físicas y fisicoquímicas del agua y de los estratos geológicos presentes. Por ejemplo cuando sedimentos no consolidados o una serie de los mismos yace sobre una roca de basamento, normalmente existe suficiente contraste natural entre estas dos unidades, pero ocasionalmente el subsuelo puede ser tan homogéneo que muchos de los métodos geofísicos de exploración no son aplicables porque no existe suficiente contraste; sin embargo aun así la prospección ha indicado que la formación es uniforme. El conocimiento de la composición de los sistemas acuíferos es muy útil para la interpretación de los datos geofísicos y a su vez el uso de varios métodos geofísicos puede minimizar la cantidad de perforaciones necesarias para definir las condiciones del subsuelo.

Los métodos de superficie incluyen técnicas de sísmica de reflexión y de refracción, gravimetría, magnetometría, resistividad eléctrica y electromagnética; los de profundidad, técnicas de medición del diámetro, del flujo vertical, de temperatura, resistividad, potencial espontáneo, radiación gamma, neutrones y propiedades acústicas. Cada una de estas técnicas tiene su capacidad particular de reflejar ciertas propiedades de los acuíferos, como ser estructura, litología, salinidad, etcétera, aunque sólo algunas de ellas son de uso frecuente en hidrogeología (sobre todo en el país) y serán detalladas más adelante. Una característica común a todos los métodos geofísicos es que la interpretación de los datos medidos requiere entrenamiento y

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 3 de 19 hojas

experiencia, puesto que lo que la geofísica mide son propiedades físicas del subsuelo (densidad, propiedades eléctricas, magnéticas, nucleares y acústicas) y nunca directamente propiedades geológicas, hidrológicas o químicas. Normalmente, mediciones en áreas nuevas deben ser correlacionadas con muestras litológicas de perforaciones cercanas antes de que puedan ser interpretadas. Uno de los problemas frecuentemente encontrados es que las señales registradas por un instrumento geofísico no solamente consisten en las señales del acuífero o formación investigada, sino que muchas veces están afectadas por "ruidos" procedentes del operador, instrumento y/o del medio ambiente. Estos ruidos de fondo deben ser distinguidos como tales por el operador y eliminados para reconocer las reales señales geológicas.

La selección del método a ser empleado depende:

- del tipo de información buscada,
- la naturaleza del material acuífero y del fluido contenido,
- de su aplicación en superficie o en profundidad,
- de si la perforación está entubada o no y,
- del dinero disponible para la exploración geofísica.

2 Métodos de Superficie o indirectos

Los métodos geofísicos de superficie proveen información específica sobre la estratigrafía y la estructura de la geología local como así también sobre propiedades de los acuíferos.

Los métodos más comunes en hidrogeología son los de resistividad eléctrica. La sísmica de refracción también puede utilizarse pero no son tan comunes. La prospección gravimétrica se ha utilizado para determinar la profundidad del basamento en depósitos aluviales y para delimitar paleocauces. Fuertes gradientes de gravedad pueden indicar un cambio brusco en la profundidad del basamento, por ejemplo una escarpa de falla cubierta por sedimentos. Métodos gravimétricos y magnetométricos pueden ser útiles para hallar la estratigrafía de rocas consolidadas y localizar fallas.

Exploraciones magnetométricas se han empleado para estudiar acuíferos basálticos y cuencas aluviales con basamento de rocas magnéticamente susceptibles.

Siempre es recomendable, si no necesaria, la correlación de datos geofísicos con el perfil litológico de por lo menos una perforación.

2.1 Resistividad Eléctrica

Este método, ampliamente conocido como "prospección geoeléctrica", está basado en evaluar la resistividad aparente del material del subsuelo haciendo pasar una corriente eléctrica conocida y midiendo la diferencia de potencial entre dos puntos (Figura 2.1). La corriente se aplica mediante estacas metálicas clavadas en el suelo, con un

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 4 de 19 hojas

distanciamiento que varía desde unos pocos metros a varios cientos, dependiendo de la profundidad deseada para medir la resistividad.

Para evitar la polarización, se aplican corrientes alternas de baja frecuencia o corriente continua con potenciales hasta 200 voltios. Para conseguir un buen contacto eléctrico en suelos secos, estos pueden necesitar ser humedecidos alrededor de los electrodos de corriente. La diferencia de potencial (voltaje) es medida con dos electrodos separados ubicados sobre una línea entre los electrodos de corriente. Estos electrodos de potencial pueden consistir en estacas metálicas o vasos cerámicos porosos con una solución saturada de sulfato de cobre.

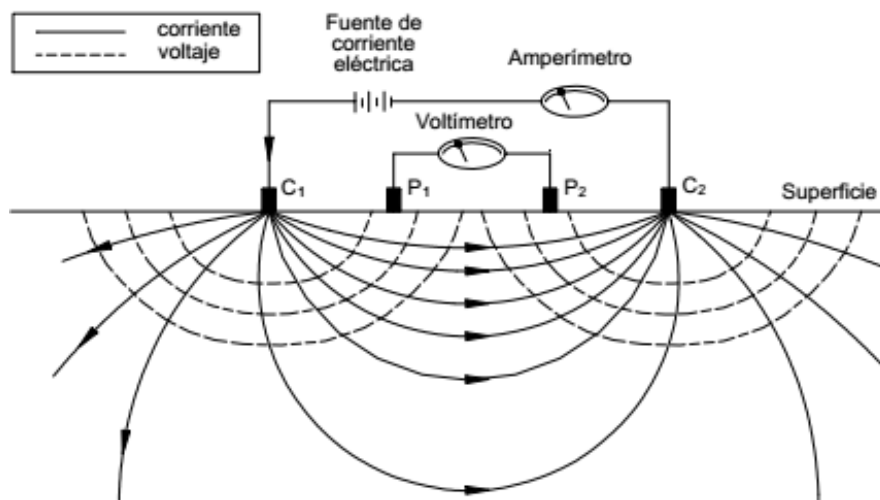


Figura 2.1: Disposición de los electrodos, los que emiten corriente (C1 y C2) y los que miden el voltaje en el terreno (P1 y P2)

La resistividad aparente aumenta con un incremento:

- en la porosidad del material,
- una disminución del contenido de agua y,
- una disminución de la salinidad del agua contenida en la formación.

Los valores de resistividad aparente varían desde 1 ohm-m o menos para arcilla con agua salada hasta 10^8 ohm-m o más para rocas ígneas sólidas y cuarcitas; rocas meteorizadas presentan valores menores.

- Acuíferos de arena o grava con agua dulce tienen valores de resistividad aparente entre 15 y 600 ohm-m.
- Los valores inferiores (15 a 20 ohm-m) son característicos de acuíferos con un contenido de sales en el agua desde algunos cientos hasta unos 1000 mg/l.
- Los valores más altos, de 300 a 600 ohm-m, han sido observados en acuíferos basálticos.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 5 de 19 hojas

- Valores menores de 10 ohm-m son indicativos de acuíferos con agua salada o salobre; en agua dulce la resistividad aparente es de aproximadamente 50 ohm-m y la del agua de mar menor de 1 ohm-m.

Flujo eléctrico en medio isótropo y homogéneo

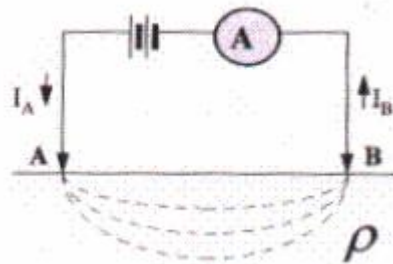


Figura 2.1a: Flujo eléctrico en un medio isótropo y homogéneo (extraído de M. Auge, 2008).

En la figura 2.1a se esquematiza el flujo eléctrico de una corriente continua, a través de un medio isótropo y homogéneo de resistividad, que se inyecta en el terreno por A, con una intensidad I_A y sale del mismo por B (I_B). En condiciones de régimen estacionario (sin pérdidas ni ganancias entre A y B), resulta que:

$$I_A = I_B \quad (1)$$

Si los electrodos A y B están separados por una distancia considerable y el subsuelo es homogéneo e isótropo, las líneas de corriente son radiales y divergentes y las superficies equipotenciales semiesféricas (figura 2.1b). En este caso la resistividad del subsuelo será:

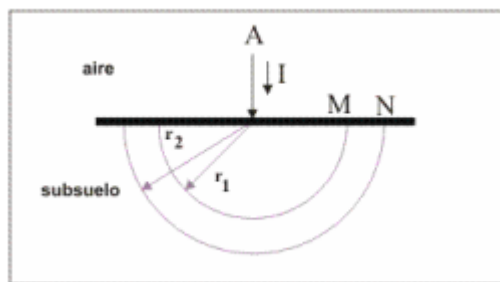


Figura 2.1b: Flujo eléctrico en un medio isótropo y homogéneo (extraído de M. Auge, 2008).

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

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 6 de 19 hojas

Donde **K** se denomina **constante geométrica**, porque depende directamente de la geometría del dispositivo empleado para inyectar y medir la corriente y tiene las dimensiones de una distancia.

El componente geológico natural no es isótropo ni homogéneo, por lo que las superficies equipotenciales y las líneas de corriente no son regulares y rectas (Fig 2.1c) y la resistividad obtenida de la ecuación 2, corresponderá a una integración de los valores medios, en los que inciden la anisotropía y la heterogeneidad del terreno y la posición relativa de los electrodos; a esta resistividad se la denomina aparente (ρ_a). En la práctica lo que se mide es la resistividad aparente (ρ_a) para lo cual se emplean dos tipos de dispositivos (lineales, que son los que veremos en esta cátedra con los sondeos eléctricos verticales y, dipolares como las calicatas eléctricas).

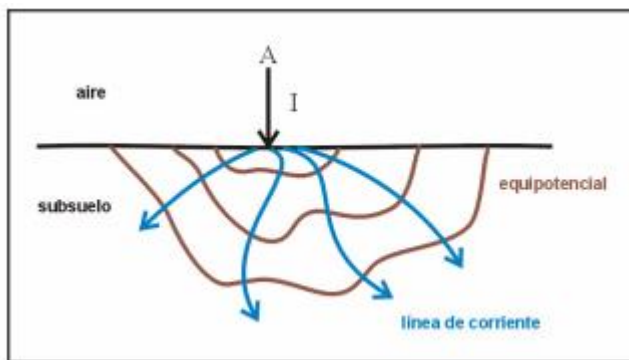


Figura 2.1c: Flujo eléctrico en un medio natural (extraído de M. Auge, 2008).

2.1.1 Dispositivos lineales

Los electrodos de inyección de corriente (A y B) y los de medición del potencial (M y N) se disponen alineados, de acuerdo a las configuraciones propuestas por Schlumberger y Wenner.

2.1.1.1 Configuración Schlumberger

Es un dispositivo simétrico que debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a AB debe ser mayor o igual que 5MN (Fig. 2.2).

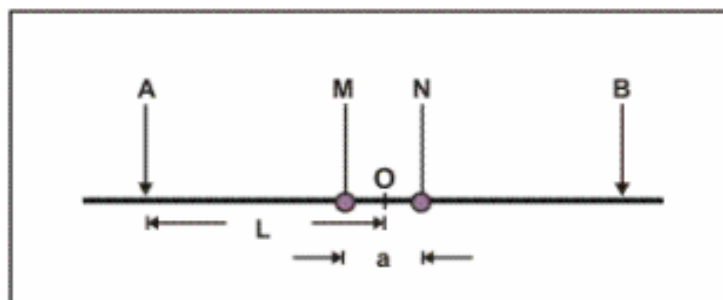


Figura 2.2: Configuración de posición de los electrodos Schlumberger (extraído de M. Auge, 2008).

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 7 de 19 hojas

Los valores de resistividad aparente se representan en función de $AB/2$ y la constante geométrica es:

$$K = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \approx \frac{\pi \cdot L^2}{a}$$

2.1.1.2 Configuración Wenner

También es un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equiespaciados (Fig. 2.3).

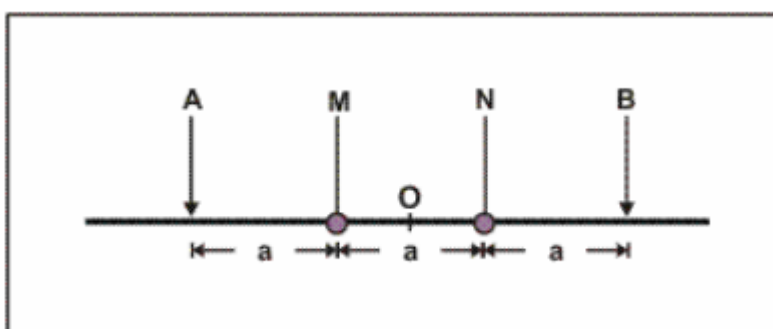


Figura 2.3: Configuración de posición de los electrodos Wenner (extraído de M. Auge, 2008).

La constante geométrica es:

$$K = 2 \cdot \pi \cdot a$$

2.1.2 Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Consiste en un conjunto de determinaciones de la resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivos lineal y separación creciente entre los electrodos de emisión y recepción (Fig. 2.2 y 2.3). Considerando el dispositivo Schlumberger (Fig. 2.2), los SEV se pueden clasificar en función de la separación final entre A y B de la siguiente manera (tabla siguiente)

TIPO DE SEV	LONGITUD	PRINCIPAL APLICACIÓN
corto	AB hasta 250 m	Geotecnia y Arqueología
normal	250 m < AB < 2.500 m	Hidrogeología
largo	2.500 m < AB < 25.000 m	Prospección petrolera
muy largo	hasta 1.200 km	Investigación geofísica

El objetivo de un SEV es la obtención de un modelo de variación de la resistividad aparente en función de la profundidad, a partir de mediciones realizadas en superficie. La profundidad alcanzada por la corriente aumenta a medida que crece la distancia

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 8 de 19 hojas

AB, aunque generalmente no existe una relación de proporcionalidad entre ambas. Para generar y registrar un SEV se requiere:

- **Circuito de emisión**, integrado por una fuente de energía, un amperímetro para medir la intensidad de la corriente, puntos de emisión (A y B) consistentes en clavos metálicos de 0,5 a 1 m de largo y 20 mm de diámetro y cables de transmisión. En sondeos normales se utiliza una batería de 12 voltios en serie con un convertidor de unos 250 W de potencia. El amperímetro permite registrar hasta 10 A, con una precisión del 1% y resolución de 0,1 mA. El cable de transmisión tiene una sección de 1 mm² y para transportarlo y extenderlo se arrolla a un carrete de unos 500 m de capacidad.
- **Circuito de recepción**, compuesto por un milivoltímetro electrónico de alta impedancia y dos electrodos para la medición del potencial (M y N) impolarizables, constituidos por vasos con fondo poroso que contienen una solución saturada de sulfato de cobre, en los que se sumerge una varilla de cobre que está conectada al cable de medición del circuito

2.1.2.1 Medición de campo

Para la realización de un SEV normal (distancia entre A y B de 250 a 2500 m) se requiere de un operador y 3 a 4 ayudantes para mover los electrodos. Pueden efectuarse entre 3 y 6 por día, en función de la longitud final, la distancia entre uno y otro y las características topográficas. Luego de establecer la ubicación del sondeo, la dirección de sus alas e instalar el instrumental de medición en el centro, se colocan los 4 electrodos (A M N B) de acuerdo al dispositivo a utilizar (Fig. 2.4). Se compensa el potencial natural del terreno y se lo energiza con una corriente continua de intensidad I en mA (electrodos AB) y se lee la diferencia de potencial ΔV en mV (electrodos MN). Los valores se vuelcan en una tabla y se calcula la resistividad aparente (a en m).

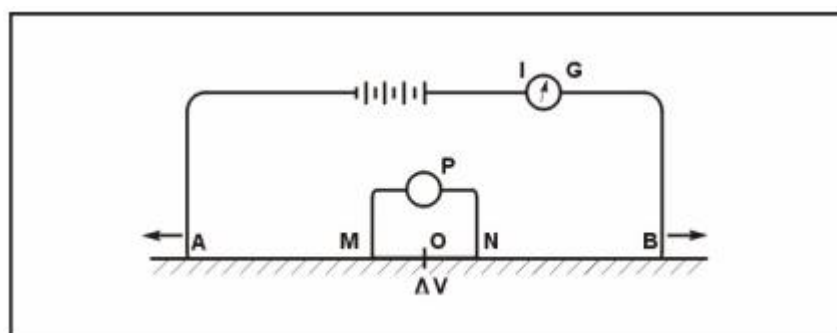


Figura 2.4: Dispositivo Tetraelectródico Schlumberger (extraído de M. Auge, 2008)

Si el dispositivo es Schlumberger, los valores a se calculan mediante la ecuación:

$$\rho_a = \frac{\pi (AB^2 - MN^2) \Delta V}{4MN I}$$

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 9 de 19 hojas

En la siguiente tabla se representan las variables requeridas para el cálculo de ρ_a y en la Fig. 2.5 la variación de la misma en función de $AB/2$, en relación logarítmica.

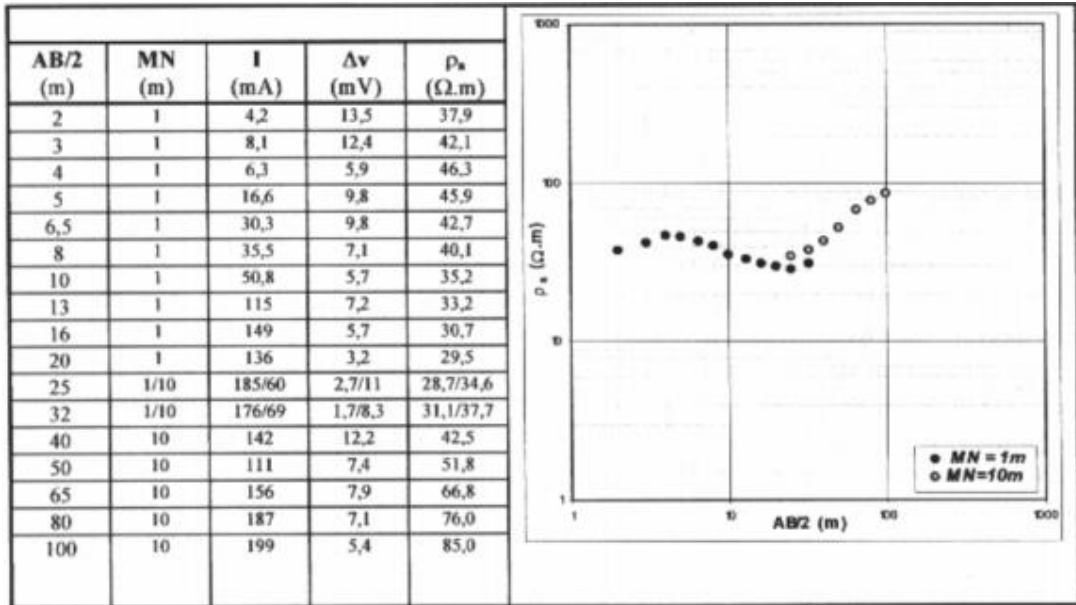


Figura 2.5: Variables para el cálculo de ρ_a y variación de ρ_a en función de $AB/2$ (extraído de M. Auge, 2008).

La finalidad del SEV es establecer la distribución vertical de la **resistividad específica o real ρ_e** por debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente (CRA).

Esto no resulta sencillo pues la profundidad de investigación no es igual a $AB/2$ (Schlumberger) ni al parámetro a (Wenner), debido a que depende de la geometría de estos dispositivos y de los cambios de resistividades en el subsuelo. Con el objeto de disponer de órdenes de magnitud de los volúmenes involucrados, puede decirse que la mayor parte de la corriente inyectada queda dentro de un paralelepípedo geológico de un ancho $AB/2$, de un largo $3AB/2$ y de un espesor $AB/4$ (Fig. 2.6).

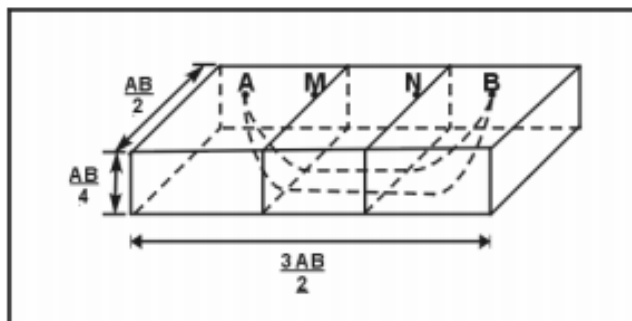


Figura 2.6: Paralelepípedo Geológico afectado por la Corriente - Dispositivo Schlumberger (extraído de M. Auge, 2008).

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 10 de 19 hojas

En la Fig. 2.7 se representa la distribución de la corriente en el subsuelo, para una separación inicial A1B1 de corta distancia, lo que hace que esta circule sólo por la capa de resistividad ρ_1 y espesor h . En esta condición la resistividad aparente ρ_a es igual a la resistividad específica ρ_e . Al incrementar la distancia de los electrodos de corriente a A2 B2, ésta va a circular por las capas de resistividades ρ_1 y ρ_2 , por lo que en el valor de ρ_2 también incidirá ρ_1 y por ende la resistividad aparente de ρ_2 será distinta de su resistividad específica. En el sector inferior de la figura se representa en relación logarítmica en el eje de las y a la resistividad aparente y en el de las x a $AB/2$, apreciándose una disminución de la resistividad en profundidad, por lo que $\rho_1 > \rho_2$, con valores que se obtienen a partir de las líneas asintóticas a las formas curvas.

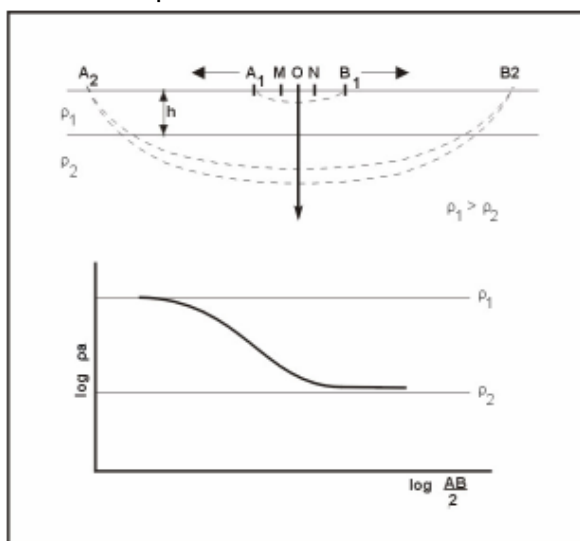


Figura 2.7: Disposición eléctrica de un SEV Schlumberger y representación gráfica de los registros (extraído de M. Auge, 2008).

En la Fig. 2.8 se representa la configuración del subsuelo para 2 capas resistivas, en el caso de **a** y de **3**, en el caso de **b**. En las mismas pueden observarse culminaciones (1, 3) y depresiones (2), también denominadas **mesetas**, que corresponden a las resistividades aparentes y ramas inclinadas descendentes (3, 4) y ascendente (5), que unen a las mesetas. Las ramas descendentes indican una disminución de la resistividad en profundidad y las ascendentes un aumento

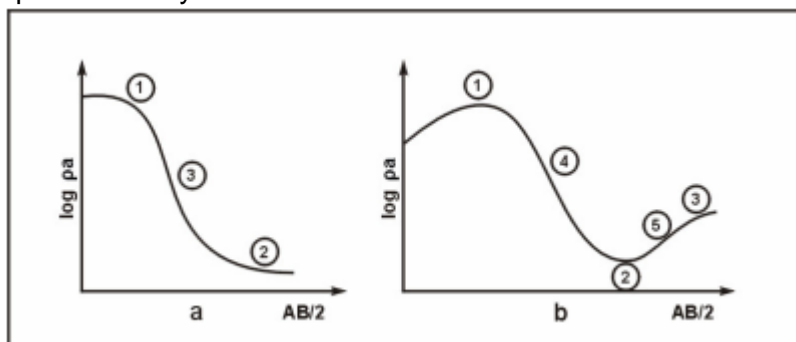


Figura 2.8: Curvas de resistividades aparentes para 2 y 3 capas (extraído de M. Auge, 2008).

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 11 de 19 hojas

En la Fig. 2.9 se representan esquemáticamente las formas de las curvas de resistividad aparente versus $AB/2$ para 2, 3 y 4 capas y diferentes relaciones de a en profundidad

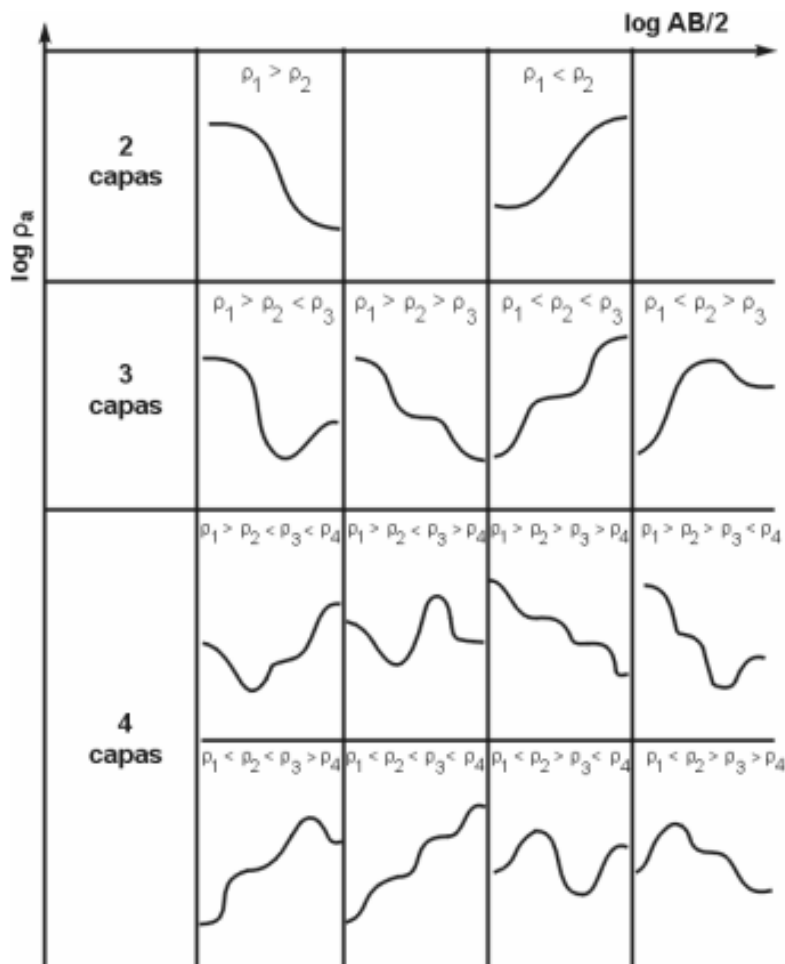


Figura 2.9: Curvas de resistividades aparentes para 2, 3 y 4 capas

2.4.2. Interpretación de SEV

El objetivo de la prospección geoelectrica es establecer la conformación del subsuelo mediante la ubicación espacial de las capas resistivas (perfil geoelectrico) para posteriormente transformar el perfil geoelectrico en otro, que represente los caracteres geológicos subterráneos (perfil geológico). Para identificar las profundidades de las capas con diferentes resistividades, deben compararse las curvas obtenidas en el campo con otras confeccionadas en gabinete que se denominan curvas teóricas, mediante un procedimiento similar al que se empleó para calcular los parámetros hidráulicos por el método de Theis, es decir por macheo. La comparación entre curvas de campo y teóricas puede realizarse en forma manual, cuando las capas involucradas son 2 o 3. Este procedimiento se usó hasta la década de 1970, mediante el empleo de catálogos de curvas teóricas de resistividad como las elaboradas por: Compagnie Générale de Géophysique (1955) con 480 curvas de 3 capas; Orellana y Mooney (1966) con 25 curvas para 2 capas (figura 19), 912 para 3 y 480 para 4 capas.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 12 de 19 hojas

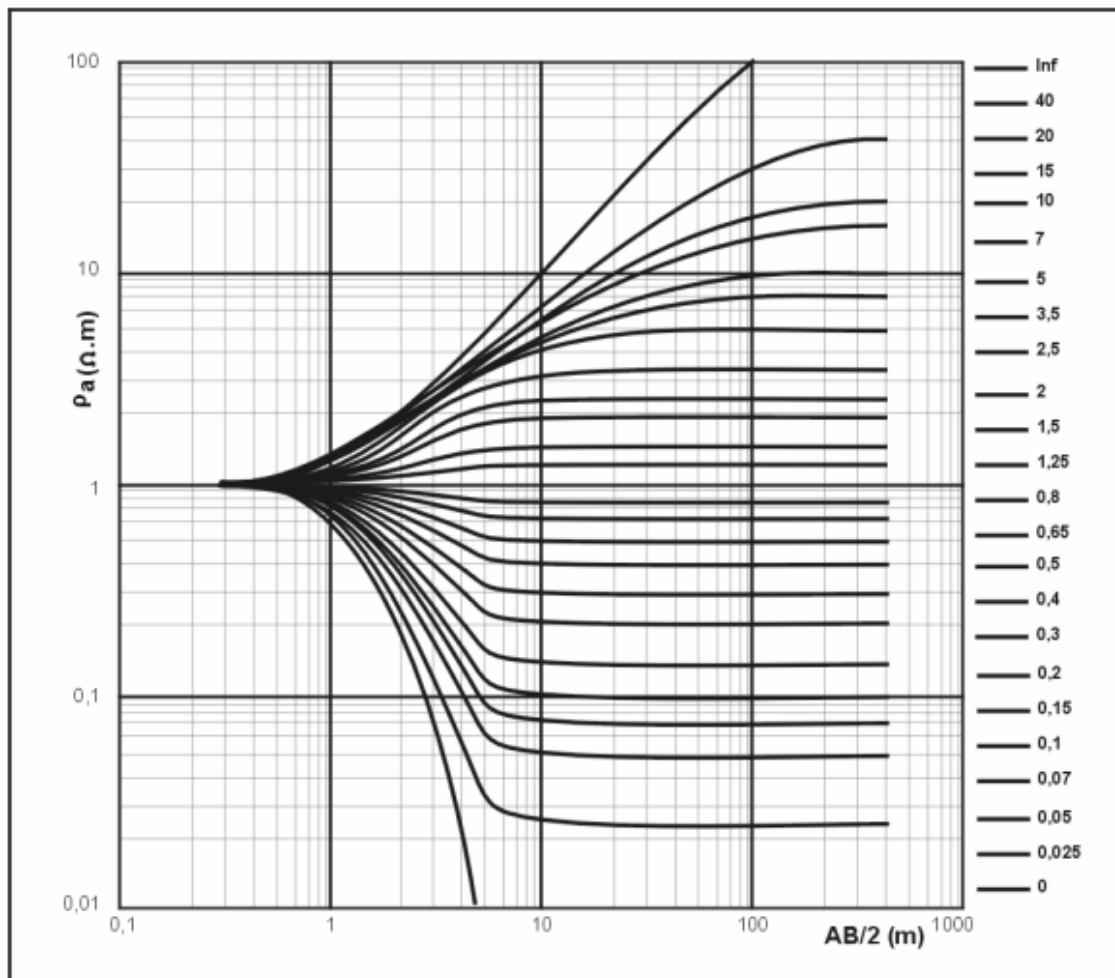


Figura 2.10: Ábaco para dos capas

El procedimiento manual se complica cuando la cantidad de capas involucradas es 4 o más, pero esta limitación puede mejorarse sensiblemente mediante el uso de programas preparados para las computadoras personales a partir de 1970. Los software actuales realizan una rápida comparación de las curvas de campo con las teóricas y por ende también permiten una rápida solución del problema. Entre estos, los empleados con más frecuencia son los desarrollados por Johansen (1975) que requiere de un corte geoelectrico inicial aproximado y Zodhy (1989). Este último es el más utilizado en la actualidad y se basa en la interpretación automática de los SEV (Schlumberger o Wenner), mediante un método iterativo para ajustar las resistividades aparentes y los espaciamientos electródicos, a las resistividades específicas o reales y a las profundidades de las capas involucradas.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 13 de 19 hojas

3 Registros en Perforaciones

Los registros en perforaciones, generalmente llamados perfilajes geofísicos, consisten en bajar en la perforación uno o más sensores fijados a un cable conductor y registrar sus señales a medida que son ascendidos a la superficie

En perforaciones ejecutadas a percusión el análisis de los detritus de perforación permite obtener un perfil de una exactitud razonable. Esto no es el caso en las perforaciones ejecutadas por el método rotativo, en las cuales solamente mediante un perfilaje geofísico se logra información de precisión suficiente, con la ventaja de obtener al mismo tiempo datos adicionales muy valiosos e imposibles de conseguir por otros medios.

Las técnicas de perfilaje, desarrolladas en los años 20 por la industria petrolera, han encontrado una amplia aplicación en la investigación de agua subterránea. Los más usados son los perfilajes eléctricos, el de resistividad y el de potencial espontáneo y los perfilajes radiactivos, el de rayos gamma (Gamma Ray).

3.1 Los perfilajes eléctricos

Solamente pueden ser realizados en perforaciones abiertas y llenas del lodo de inyección y comúnmente consisten en una curva de potencial y una o más de las resistividades registradas sobre en un mismo gráfico. Los registros más útiles son los de resistividad y potencial espontáneo (Fig. 2.11).

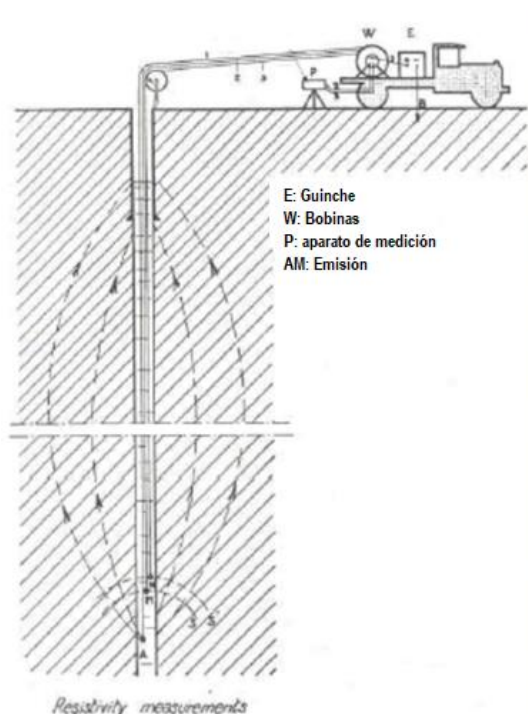


Figura 2.11: Esquema de dispositivos de perfilajes eléctricos

En general un equipo de perfilaje eléctrico incluye cuatro componentes principales:

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 14 de 19 hojas

- Una unidad electrónica que alimenta de corriente eléctrica a la sonda en la perforación y mide los parámetros resultantes.
- Un guinche o bobina con el cable conductor.
- Una sonda colgada del anterior, de la cual la corriente eléctrica pasa al lodo de inyección y a la formación.
- Un registrador automático para graficar en forma de curva continua los valores de resistividad o potencial en función de la profundidad. Algunos perfiladores ejecutan simultáneamente dos o más registros vinculados, por ejemplo resistividad y potencial espontáneo, o radiación gama y resistividad de punto solo. Otros registran un parámetro por corrida, lo que permite una mayor amplitud de registro en la faja de papel facilitando el reconocimiento de detalles. También existen equipos que no grafican las señales, sino que éstas son leídas del instrumento medidor a intervalos regulares de profundidad y representadas manualmente.



Figura 2.12: Camión antiguo y moderno de perfilajes.

3.1.1 Perfiles de resistividad.

Para obtener un perfil de la resistividad aparente de las formaciones, una corriente alterna es aplicada a dos electrodos y la diferencia de potencial entre estos electrodos, u otros dos, es medida con un potenciómetro registrador; la cantidad de corriente total se mide con un amperímetro. Se utilizan varias disposiciones diferentes de electrodos, siendo la más simple la monoeléctrodica o de punto sólo, en la cual un electrodo de

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 15 de 19 hojas

corriente es colocado en la superficie cerca de la perforación y el otro bajado a la perforación. Como ya se dijo, ésta debe estar abierta, es decir sin entubamiento, y llena del lodo de inyección o de agua. La diferencia de potencial es medida entre el electrodo de corriente en la perforación y un electrodo de potencial situado en la superficie. La resistividad medida con esta disposición corresponde principalmente a una pequeña región esférica alrededor del electrodo en la perforación y es muy afectada por la resistividad del lodo y la parte de la formación invadida por mismo.

Prácticamente no permite deducir la resistividad aparente de la formación pero sí los límites de esta. En otra disposición de electrodos, un electrodo potencial adicional es usado dentro de la perforación. Este electrodo puede estar ubicado a una distancia relativamente pequeña (16 pulgadas) por encima del electrodo de corriente (normal corta o normal 16) o a una distancia relativamente grande (64 pulgadas) por encima de dicho electrodo, llamándose entonces normal larga o normal 64.

Los registros monoelectrónicos y de normal corta dan una mejor resolución de los detalles litológicos, pero el dispositivo normal corta mide la resistividad aparente de la formación inmediatamente alrededor de la perforación, la cual probablemente esté invadida por la inyección. Las normales largas tienen una mayor penetración lateral y dan un valor más preciso de la resistividad aparente de la formación, permitiendo una mejor interpretación del perfil en cuanto al tipo de roca y a la calidad del agua.

Los llamados perfiles laterales se obtienen con los dos electrodos de corriente en la perforación, separados por una distancia relativamente grande (aproximadamente 15 metros) y con los electrodos de potencial relativamente juntos a una distancia de aproximadamente 5 metros debajo del electrodo de corriente inferior. Esta disposición proporciona la mejor definición de los contactos entre unidades litológicas y el valor más representativo de su resistividad aparente, aunque algo exagerado.

La resistividad de formaciones acuíferas depende principalmente de la salinidad del agua y de la porosidad del material.

La interpretación de perfiles de resistividad generalmente es más exitosa si se la hace juntamente con el perfil de potencial espontáneo.

Los valores de resistividad son más altos para rocas sólidas y densas y más bajos para arcillas y lutitas. Resistividades medias en combinación con potenciales espontáneos negativos pueden indicar arenas acuíferas.

Si se conocen el material de la formación y su porosidad, la resistividad aparente medida puede proveer una estimación de la salinidad del agua subterránea, previa corrección por el diámetro de perforación, disposición de electrodos, resistividad del lodo, penetración del lodo, espesor del acuífero, temperatura y algún otro factor.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 16 de 19 hojas

3.1.2 Potencial espontáneo.

Un perfil de potencial espontáneo (usualmente llamado SP) es obtenido registrando las diferencias de voltaje que ocurren naturalmente entre un electrodo situado en la superficie cerca de la perforación y otro abajo dentro de la misma.

La perforación debe estar sin entubamiento y aún llena del fluido de perforación. A medida que la sonda con el electrodo pasa frente a diferentes formaciones se registran variaciones en la diferencia de potencial, que son debidas a efectos electroquímicos entre los diferentes estratos, a diferentes potenciales de flujo, y otros efectos electrocinéticos asociados al movimiento de agua a través de los estratos geológicos.

El registro resultante proporciona una idea aproximada de la profundidad de los límites entre estratos y del tipo de material.

Cerca del borde derecho de un registro de SP se encuentra la llamada "línea de arcillas", indicando la presencia de horizontes impermeables como arcillas, lutitas y rocas compactas. Por conveniencia esa línea de arcillas representa el cero o el potencial de referencia, de manera que los registros hacia la derecha de la línea son positivos y los hacia la izquierda negativos (Fig. 2.6).

El borde izquierdo de la curva se llama la "línea de arena" y representa estratos más permeables como arenas, gravas, areniscas y rocas con porosidad secundaria. La distinción cualitativa entre zonas conteniendo agua altamente mineralizada o agua dulce es un resultado importante en la interpretación de perfiles de potencial espontáneo. En una perforación llena de agua eso es posible siempre que el agua contenida en la perforación sea químicamente diferente de aquella en la zona acuífera, lo cual muy frecuentemente no es el caso.

Las suposiciones involucradas en una interpretación cuantitativa del SP pocas veces se cumplen en los estudios de agua subterránea y su aplicación suele llevar a errores.

3.1.3 Radiación gama natural.

Los perfiles de la emisión natural de radiación gama de los diferentes estratos se obtienen introduciendo en la perforación un detector de rayos gama y registrando su señal de salida (cuentas por segundo). Puesto que la radiación gama pasa a través de metales, esta técnica también puede ser usada en perforaciones entubadas, llenas o vacías de fluido.

Arcillas y lutitas contienen mucho más elementos emisores de radiación (K40 y productos derivados de uranio y torio por ejemplo) que calizas y arenas.

Los granitos emiten radiación gama a un nivel moderado de intensidad, mientras que algunos materiales volcánicos, por ejemplo tobas, pueden presentar una radiación considerable.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 17 de 19 hojas

Los perfilajes de radiación gama natural se utilizan principalmente para distinguir entre materiales con y sin arcilla, mejorando así considerablemente la interpretación de los perfilajes eléctricos.

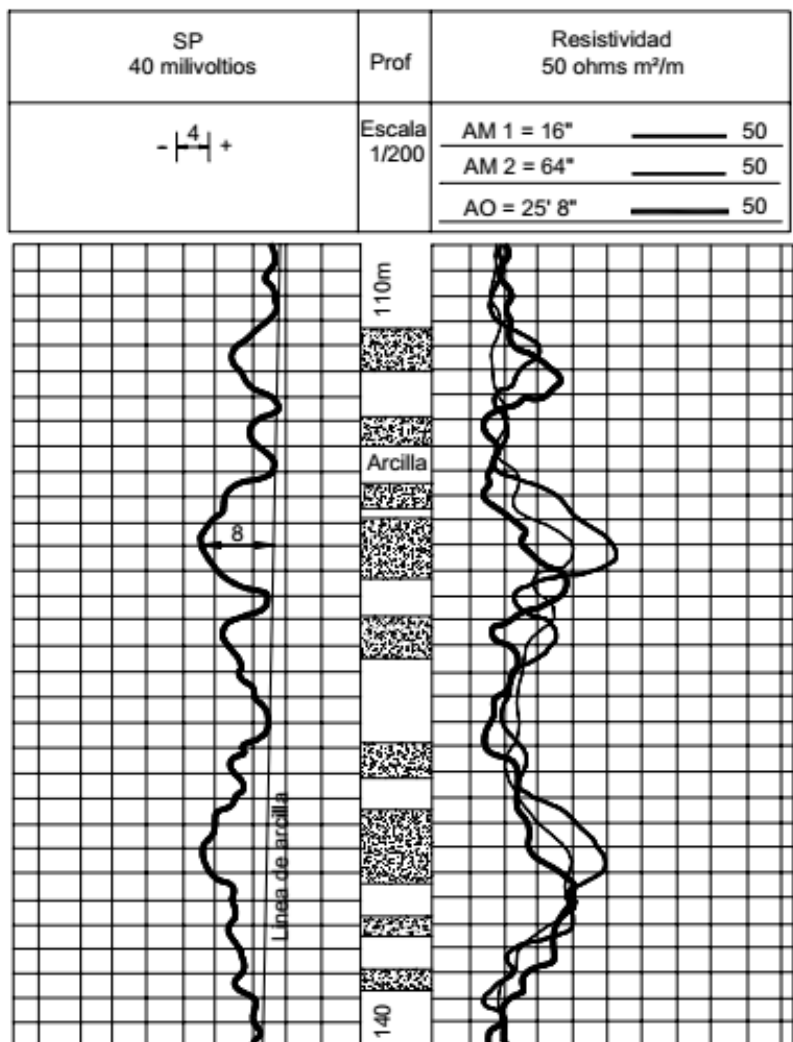


Figura 2.6: Perfilaje de potencial espontáneo y resistividad

4 Perforaciones de Estudio

Las perforaciones de estudio tienen por objetivo complementar las tareas de exploración interiores, con campañas de perforaciones convenientemente distribuidas, agregando una serie de conocimientos sobre el subsuelo necesarios para lograr un resultado eficaz en la ubicación, diseño y construcción de pozos explotables. Constituyen la única manera de obtener datos concretos y precisos sobre la geología y el agua subterránea. La cantidad relativa de tiempo y esfuerzo a invertir en prospección geofísica o perforaciones de estudio depende de la situación hidrogeológica, de la información necesitada y los costos. Donde la profundidad del agua subterránea, el material consolidado o ambos hacen las perforaciones relativamente costosas, puede ser conveniente extender al máximo la prospección geofísica antes de decidir las perforaciones. Donde por el contrario el agua

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 18 de 19 hojas

subterránea se encuentra relativamente cerca de la superficie y/o los materiales no son consolidados, las perforaciones son relativamente económicas y puede resultar más ventajoso hacer un mínimo de geofísica y basar la exploración más en perforaciones.

Las perforaciones, adecuadamente revestidas y ubicadas pueden ser utilizadas para ensayos de permeabilidad, como piezómetros y/o como pozos de observación en los ensayos de bombeo, o también, según el caso, ser posteriormente convertidas en perforaciones de producción mediante ensanche y entubado. Las perforaciones de estudio generalmente son de diámetro pequeño, menos de 150 mm, pero en estudios locales, como son los de fuentes subterráneas para abastecimiento, interesan además diámetros mayores, de 250 mm o más, que permitan la realización de ensayos de bombeo convencionales. En general la información a ser proporcionada por el conjunto de perforaciones de estudio de un proyecto es la siguiente:

- Perfil geológico, con la profundidad y la litología de los estratos atravesados y en medios acuíferos no consolidados como arenas y gravas, la granulometría para estimar la permeabilidad y efectuar el cálculo de filtros y prefiltros de grava de los pozos de explotación. Además, el establecimiento de la serie estratigráfica puede ser de interés para la programación del estudio, sobre todo en cuanto a la profundidad a investigar.
- Nivel piezométrico de los horizontes acuíferos de interés, los que además del acuífero a explotar pueden comprender a otros vinculados al mismo.
- Calidad química del agua subterránea: imprescindible para determinar el uso del agua y los materiales requeridos para las perforaciones. Debe tenerse en cuenta la salinidad, límites de potabilidad química y bacteriológica, carácter corrosivo o incrustante, eventual contaminación y todo otro dato que permita planificar las perforaciones futuras de producción. En acuíferos costeros y lentes de agua dulce, la variación en profundidad de la calidad química del agua es utilizada para determinar la posición de la interfaz agua dulce-agua salada.
- Parámetros hidráulicos: se determina mediante ensayos de acuífero convencionales en el (los) horizonte(s) de interés; si las condiciones lo requieren, las variaciones de permeabilidad pueden hallarse mediante los correspondientes ensayos en sondeos de pequeño diámetro (Lefranc, Gilg-Gavard, Bouwer, etc.)

5 Bibliografía

Allan Freeze y John Cherry. Groundwater. 1979. hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/1979-espanol/

Auge, M. 2008. Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. Buenos Aires.

Custodio, E y M.R Llamas. 1996. Hidrología Subterránea. Tomos I y II. Segunda Edición Corregida. Editorial Omega. España.

FACULTAD DE INGENIERÍA UNCUYO	AGUAS SUBTERRÁNEAS	
4º AÑO INGENIERÍA EN PETRÓLEOS	UNIDAD 5: Exploración Aguas Subterráneas	Hoja N° 19 de 19 hojas

ENOHSA ENTE NACIONAL DE OBRAS HÍDRICAS DE SANEAMIENTO.
Fundamentación. Cap. V - Hidrogeología