

## DETECTABILIDAD DE ACUIFEROS PROFUNDOS MEDIANTE METODOS DE PROSPECCION ELECTRICA DE RESISTIVIDAD APARENTE

Ing. Edgardo L. Cebrelli

Estos métodos de prospección geofísica han alcanzado, a nivel mundial, una difusión enorme por su gran versatilidad, costo moderado de los equipos necesarios y también de la unidad de área explorada.

En rigor, la detección de un acuífero no se diferencia respecto a la de cualquier otro medio o cuerpo yacente por debajo de la superficie de la tierra. Desde un punto de vista estrictamente geofísico, para que un medio cualquiera pueda ser detectado mediante medidas de una determinada magnitud física tomadas desde la superficie, es necesario que exista un grado de contraste mínimo entre esa formación objetivo y la/s que, inmediatamente, subyace/n o está/n por encima o por debajo.

Es, por lo tanto, necesario precisar algunas definiciones y concretar —o mejor cuantificar— el significado de determinados adjetivos. Por esta razón, comienzo especificando dos conceptos: primero el de acuífero y luego sus entornos probables. Por último, el significado del adjetivo “profundo” para el caso.

El agua en el ciclo hidrológico, luego de precipitada penetra en proporción significativa por debajo de la superficie del suelo y rellena, total o parcialmente, los poros y espacios vacíos que presentan especialmente los suelos sueltos, inconsolidados y, en menor proporción, los que forman rocas de texturas más coherentes, en este caso representados por diaclasas, fracturas y grietas que reconocen como causas comunes variaciones térmicas, efectos mecánicos y, aún, galerías y cavernas provocadas por fenómenos de disolución parcial entre los que el más llamativo es el de karstificación.

Desde un punto de vista general, se define esta aptitud variable de los suelos para almacenar y transmitir agua, mediante dos coeficientes: el de ALMACENAJE, simbolizado por la letra “S” y el de TRASMISIBILIDAD, “T”. El primero puede definirse expresando que es el volumen susceptible de liberarse por causa del campo gravítico terrestre, en cada unidad de volumen de suelo, cuando el potencial hidráulico —es decir, su nivel piezométrico— disminuye en una unidad. Por su parte una forma inmediata de definir a la trasmisibilidad es igualarla al producto del espesor del medio considerado por su permeabilidad, es decir, es el volumen que podría aportar una superficie de  $b$  metros cuadrados, correspondiente a un rectángulo de 1 metro de base por el espesor  $b$  del acuífero como altura.

Sobre la base de estos dos conceptos todos los terrenos, cualquiera sea su naturaleza, se clasifican en cuatro grandes grupos, a saber:

- 1) acuíferos, son aquéllos que presentan los valores más altos, tanto en lo referente a almacenaje como a trasmisibilidad. Son —desde el punto de vista restringido de la explotación del agua subterránea, los que presentan un mayor interés económico, ya que permiten el suministro del líquido elemento a un costo unitario menor.
- 2) acuitardos, son medios capaces de almacenar proporciones elevadas de agua y su influencia, a escala regional, puede ser significativa en lo referente al transporte de volúmenes de importancia, pero desde el punto de vista de una perforación aislada, su aporte no es importante.
- 3) acuícludos, pueden almacenar, asimismo, cantidades significativas de agua, pero en razón de su permeabilidad extremadamente pequeña, su aporte puede considerarse nulo.

- 4) acuífugos presentan valores demasiado bajos de porosidad, razón por la cual constituyen, real y efectivamente, barreras para la circulación subterránea.

Ejemplos típicos de formaciones de la clase 1) los constituyen los grandes mantos de acumulación reciente —en términos geológicos— formados por bloques, clastos y trozos de tamaños variados de rocas casi siempre afectadas severamente por la meteorización. Si su acumulación se ha producido en un ambiente continental, la clasificación u ordenamiento por tamaños y pesos específicos es muy pobre; coexisten, por lo tanto, trozos de tamaños variados, formados por minerales y rocas diversos.

Esa circunstancia, la clasificación deficiente, determina que, por ejemplo, arcillas, limos y arenas finas, es decir los componentes de tamaños menores, se entremezclen con gravas gruesas, clastos de tamaños diversos y aún, de tanto en tanto, aparezcan bloques cuyo volumen puede ser de varios metros cúbicos, anarquía provocada por el hecho de que los períodos de acumulación más intensa se correspondan —invariablemente— con las grandes crecidas, de forma tal que el régimen torrencial de deposición es su común denominador.

Las formaciones de la clase 2) reconocen un origen similar pero, por tener las corrientes que cumplieron la función de transporte una velocidad menor, hay un contraste más bajo entre los términos mayores y los más pequeños; el mismo medio que hizo las veces de portador provoca una clasificación por tamaños y densidades y, de esta manera, no es difícil observar en los cauces profundos —o cualquier otro sitio donde pueda apreciarse un corte de terreno— verdaderas capas de terrenos, muy aproximadamente homogéneas.

Los horizontes limo-arcillosos que contienen también porcentajes variables de arenas, suelen constituir buenos ejemplos de este tipo de terrenos.

Los acuícludos están constituidos por arcillas y/o limos y, menos probablemente, por otros elementos de granulometría fina hasta muy fina. Frecuentemente están cementados, al menos parcialmente, favorecida esa tendencia por la baja velocidad con que ha circulado el agua salina y por la mayor facilidad de intercambio iónico entre las moléculas formadoras de las arcillas, por ejemplo y algunas de las sales disociadas que transporta el agua.

Los acuífugos, por último, están formados por verdaderas rocas, ígneas o metamórficas y, en la gran mayoría de los casos constituyen una barrera que demarca el límite dentro del que puede considerarse factible la captación de aguas subterráneas, por lo menos en nuestro país y en este momento. Por su constitución los acuífugos aparecen en los sondeos eléctricos como aisladores, es decir, capas de resistividad muy alta.

¿Y los acuíferos secundarios? Es sabido que están constituidos por rocas o formaciones que, originariamente, no tuvieron almacenaje ni transmisibilidad adecuadas como para ser acuíferos, pero que, por alguna razón puramente accidental como movimientos sísmicos de gran magnitud, reacciones químicas con aguas fuertemente salinas (marinas, por ejemplo) que no estaban presentes en la época de su formación pueden adquirir cierta permeabilidad pero, en todo caso, están muy lejos de constituir, ni siquiera aproximadamente, medios homogéneos e isotropos; su detección constituye una tecnología diferente, que no es el objeto de este trabajo.

#### La magnitud física que se mide

Entre los métodos prospectivos con objetivos hidrogeológicos, indudablemente los que han alcanzado mayor difusión entre los eléctricos, son los que determinan la resistividad, sea mediante la aplicación de campos naturales —como es el caso de los que aplican las corrientes telúricas aisladamente o los que las consideran conjuntamente con las fluctuaciones del campo magnético que las originan— o mediante campos artificiales, creados a ese efecto, exclusivamente.

Es que esta magnitud puede determinarse con precisión adecuada mediante dispositivos, en general tetraelectródicos, que permiten calcularla tan solamente mediante la medición de una intensidad de corriente y la de la caída de potencial que ésta provoca entre dos electrodos ubicados adecuadamente en el terreno.

Como todos los métodos de prospección geofísica, requiere para su aplicación exitosa un grado de contraste adecuado entre las resistividades, en este caso y las de las formaciones vecinas y, por esta razón, se impone un estudio detenido de los valores probables de esta magnitud, tanto para la formación objetivo como para sus más inmediatos vecinos, supra y subyacentes.

**La resistividad de los acuíferos inconsolidados:** De acuerdo con ARCHIE (1) la resistividad de acuíferos de este tipo puede calcularse en función de la resistividad del agua que satura los espacios vacíos y de la naturaleza y granulometría de los clastos que los forman, por medio de la siguiente expresión:

$$\rho_{aq} = F \cdot \rho_w$$



expresión en la que:

$\rho_{aq}$  representa la resistividad del acuífero como una unidad

F es el llamado factor de formación

$\rho_w$  representa la resistividad del agua que rellena los espacios intergranulares

Esta aproximación es particularmente valiosa para el geofísico. En efecto, casi como una regla, cuando se prospecta un área puede disponerse de antecedentes ilustrativos respecto a la naturaleza de los áridos que forman los acuíferos y, en muchos casos, también referentes a la conductividad eléctrica de las aguas alumbrables mediante perforaciones en la zona. De esta manera, siempre es posible estimar —al menos— un rango de valores probables para la resistividad del acuífero.

Por su parte, la resistividad de las aguas, siempre que sea posible, debe determinarse directamente de muestras obtenidas con todas las precauciones que es de norma adoptar. Puede suceder que no se disponga de ninguna perforación suficientemente próxima y, en este caso, se cuenta con dos alternativas:

a) la estimación de un valor probable de resistividad

b) correlación con algún pozo lejano cuando existe una probabilidad razonable de que sea segura

sin embargo, estos dos caminos, dan siempre una respuesta cualitativamente útil.

Sobre el particular, cabe acotar que lo más importante, con referencia a la calidad química del agua es que, tanto su aptitud para riego como sus condiciones para satisfacer necesidades humanas pueden anticiparse —con ciertas salvedades— mediante la determinación de su conductividad eléctrica.

Para determinar la conductividad del acuífero de acuerdo con la teoría de ARCHIE es necesario, además, conocer el valor numérico del otro factor, por él denominado FACTOR DE FORMACION. Diversos autores han investigado la forma más útil y correcta de su expresión, casi todos ellos vinculados con compañías de servicios en el campo de la industria petrolera.

Hoy se acepta, sin mayores discusiones, que la expresión más adecuada para definir esos valores, es de la forma:

$$F = \frac{a}{\phi^n}$$

donde:

F = factor de formación

$\phi$  = porosidad volumétrica

a = constante que depende de la naturaleza del medio

n = constante que es función de la litología

es decir, que el Factor de Formación está ligado de manera exclusiva con la porosidad, la distribución de tamaños y la litología de los granos.

Así, por ejemplo, Archie (1) da las siguientes expresiones para los distintos casos:

---

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{0,88}{\phi^{1,37}} \quad \text{para rocas integradas por detritos, tales como arenas, areniscas, etc. de edad terciaria con porosidades entre 25 y 45\%}$$

---

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{0,62}{\phi^{1,72}} \quad \text{para rocas sedimentarias moderadamente cementadas, incluidas areniscas y calizas con porosidades entre 18 y 35\%, más frecuentemente de la era mesozoica.}$$

---

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{0,62}{\phi^{1,95}} \quad \text{para rocas sedimentarias bien cementadas, con un rango de porosidades entre 5 y 25\%, casi siempre de edad paleozoica.}$$

---

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{3,5}{\phi^{1,45}} \quad \text{para rocas volcánicas altamente porosas, con porosidades hasta el 80\%.}$$

---

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{1,4}{\phi^{1,58}} \quad \text{para rocas con menos del 4\% de porosidad, tales como rocas ígneas y metamórficas, en las que la porosidad por juntas es muy importante}$$

---

HUMBLE (2), por su parte, da para los distintos tipos de rocas, los siguientes valores:

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{0,62}{\phi^{2,15}} \text{ o bien } \frac{0,81}{\phi^2} \text{ para formaciones blandas, en general}$$

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{1}{\phi^m} \text{ para formaciones duras debiendo en cada caso seleccionarse el valor de } m \text{ más adecuado}$$

SHELL, por su parte, ha publicado una fórmula apta para carbonatos de baja porosidad y no fracturados:

$$\frac{\rho_t}{\rho_w} = \frac{1}{\phi^m} \text{ en esta fórmula } m \text{ es también función de la porosidad, por medio de la expresión:}$$

$$m = 1,87 + \frac{0,19}{\phi}$$

No es pequeña la diferencia que existe entre los valores de F cuando se calculan de acuerdo con los criterios de los diferentes investigadores.

Un caso típico lo constituye el cálculo para un caso bien común entre los acuíferos de tipo inconsolidado, aquéllos de alta porosidad que oscila alrededor de 35%.

De acuerdo con Archie s/Humble: 1a. Expresión — 2a. Expresión

$$F = \frac{0,88}{0,35^{1,37}} = 3,707 \quad F = \frac{0,62}{0,35^{2,15}} = 5,92 \quad F = \frac{0,81}{0,35^2} = 6,61$$

es decir que, según Humble, el valor de F en cifras enteras es de 6 para los acuíferos inconsolidados en tanto que para Archie, alcanza solamente a las dos terceras partes.

Ahora bien, si suponemos por ejemplo un agua de saturación con una conductividad de 1000 micro-mohs/cm —es decir 10 ohm-metro de resistividad— que satura un medio de constante de formación igual a 6, la resistividad eléctrica de ese acuífero será igual a:

$$\rho_{aq} = 10 \times 6 = 60 \text{ ohm -- metro}$$

lo que, en otras palabras, significa que acuíferos del tipo inconsolidado con porosidades del orden del 35% , saturados con agua dulce deberán tener, efectivamente, resistividades del orden de 50 a 80 ohm-metro.

Es éste un rango de resistividades que corresponde a las acuíferas de mejor calidad, tanto en lo que hace a su rendimiento específico, cuanto por la calidad química del agua que habrán de aportar.

Sin embargo no existe una relación biunívoca entre acuíferos de buen rendimiento y calidad de agua y su resistividad eléctrica porque, de acuerdo con las expresiones antes consignadas, fácil es ver que las formaciones con baja porosidad —y permeabilidad— tienen un valor de F muy alto y también que aguas de alto contenido salino presentan una conductividad elevada —o, lo que es igual, una resistividad muy baja— y por estas razones un valor aparentemente adecuado para la resistividad del conjunto.

Este peligro, el de confundir formaciones aptas con otras que no lo son, es congénito con el método y no puede ser resuelto con elementos del mismo método prospectivo.

### La resistividad de los confinantes

El constituyente más característico, tanto de acuitados como acuíclados, normalmente los confinantes superior e inferior de los acuíferos confinados, lo representan las arcillas, en ocasiones altamente salinas, limos y mezclas de ambos, a veces con alguna adición de arenas, generalmente de grano fino hasta mediano, entre los cuales los dos primeros términos, que son los más abundantes, son de resistividad baja a muy baja —entre 0,5 y 5 ohm-metro, de acuerdo con el contenido salino y la saturación en agua— que contrasta muy bien con la resistividad del acuífero típico que se ha dado más arriba.

Esta situación, dos confinantes de naturaleza conductora y en el medio un acuífero relativamente resistente es la situación más común para el caso de los llamados acuíferos confinados, en especial cuando no se trata de acuíferos basales, y la sucesión de medios eléctricos representable por las letras C · R · C. (conductor - resistente - conductor).

El caso de los llamados acuíferos libres, es decir, que carecen de confinante superior, es diferente y admite algunas variantes en cuanto a la sucesión de medios.



Así, por ejemplo, en la serie más clásica de las zonas pedemontanas, la sucesión de terrenos podría describirse así:

- una cubierta superficial, inconsolidada, formada por mantos de relleno aluvional de depositación reciente (en sentido geológico), de tanto en tanto interrumpidos por la intercalación de formaciones lenticulares de grano más fino que pueden dar origen —o no— a acuíferos “colgados” (perched aquifers)
- un acuífero que, desde el punto de vista litológico, es de la misma naturaleza que la formación anterior, pero que presenta la diferencia fundamental de estar saturado con agua.
- una formación de base que puede tener las más variadas composiciones y naturaleza; por ejemplo puede tratarse de una roca impermeable de alta resistividad (acuífuga), por ejemplo una efusión de pórfidos de edad triásica, o en el otro extremo un horizonte arcilloso-salino prácticamente impermeable, como tantos horizontes de edad terciaria.

Cada sucesión de las indicadas, corresponde a un tipo de curva diferente (de resistividad en función del semiapartamiento entre polos de envío de corriente) y en el ánimo de simplificar las cosas se estudia en esta ocasión el conjunto constituido por el horizonte suprayacente (con características de confinante o no) —el acuífero propiamente dicho— la formación de base o piso.

Si analizamos alguna colección de curvas patrón se puede constatar inmediatamente que la variación mínima de resistividades que se considera para las curvas tipo K y A en las que la resistividad del segundo medio es mayor que la del primero oscila alrededor de 1,5:1. De manera parecida para las curvas H y Q en las que  $\rho_2 < \rho_1$  la relación oscila en derredor de 0,66.

Por otra parte la relación mínima de espesores que se considera es  $\nu_2 = e_2/e_1 = 0,1$ , de donde resulta que el verdadero contraste, tanto para resistencias transversales como para conductancias longitudinales es de alrededor de 15% en más, solamente, para que la inflexión en la curva de resistividades en función del semi-apartamiento de electrodos sea visible.

En la práctica esto significa que formaciones —en este caso acuíferas— con un espesor de sólo la décima parte de la cubierta aparecerán indicadas en la respectiva curva de campo y ello asumiendo que el contraste entre las respectivas resistividades también es el menor posible.

Llegados a este punto en el razonamiento, surgen de inmediato dos preguntas:

- 1) ¿Qué sucede cuando el contraste de resistividades es mayor (caso más frecuente), se reduce en consecuencia el espesor cuando el acuífero contiene agua dulce, su factor de formación es relativamente alto y, en consecuencia su resistividad es mayor que la de los confinantes?
- 2) ¿Es posible que cuando se mantengan las relaciones entre los parámetros de base, puedan variar, dentro de ciertos límites el espesor y la resistividad del acuífero? en caso afirmativo, ¿hasta qué límites?

La contestación a las preguntas anteriores implica, necesariamente, recurrir a la aplicación del principio de equivalencia y sustitución. Un geofísico ruso, Pylaev, estudió en profundidad este problema y dejó un método gráfico sumamente efectivo para determinar estos límites. Lamentablemente, en este caso se está enfrentando el problema de determinar rangos de variación para relaciones de espesores sumamente bajas, 0,1 por ejemplo, y para esa relación de espesores, precisamente, todas las curvas muestran indeterminación.

De todas maneras, la respuesta a la primera pregunta cualitativamente es positiva, pero siempre con el significado de una ley límite; las variables no pueden oscilar, por ejemplo entre menos y más infinito, pero sí es posible, en algunos casos, apartarse hasta un 50% de los valores dados por las relaciones antedichas y lograr una detección correcta.

Ahora es oportuno, en consecuencia, precisar el significado del calificativo “profundo”. Si lo fijamos en 300 metros, acuíferas de 30 metros con un contraste de resistividades de solamente 1,5:1 serán detectables, en condiciones de registración favorables y, con toda seguridad, con un contraste de resistividades del orden de 10:1 acuíferos de sólo 10 metros aparecen en la curva de campo.

Es decir, que la prospección geoelectrica de resistividad aparente tiene una respuesta de detección positiva para la gran mayoría de los casos de interés, pero entonces: ¿a qué factores deben atribuirse los fracasos que se producen?

Pueden citarse muchas causas, pero entre las principales, a juicio del autor son importantes citarse las siguientes:

- 1) la influencia manifiesta de las heterogeneidades superficiales
- 2) la falta de relación biunívoca entre resistividad de la formación y su naturaleza. Efectivamente, acuíferos de buen rendimiento, capaces de aportar agua apta para consumo humano, tienen resistividades del orden de la mencionada al principio pero la recíproca no es siempre verdadera; es decir, una capa de 90 ohm-metro de resistividad no corresponde exclusivamente a un acuífero de Factor de Formación = 6 y con agua de resistividad igual a 15 ohm-metro.

- 3) la falta de verificación de la corrección de la solución determinada para un cierto caso. Es esto lo que se verifica mediante el procedimiento de reconstrucción de la curva de campo, procedimiento que, justo es reconocerlo, es condición necesaria pero no suficiente para asegurar que un determinado perfil "eléctrico" corresponde al litológico que podría lograrse, por ejemplo, con una perforación.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics - Am. Inst. Min. Metal. Petroleum Engineers Tech. Paper 1422.
- (2) HUMBLE, E. R. Petroleum Transactions of A.I.M.E.
- (3) DAVIES S. N. y DE WIEST R. Hidrogeología Ed. Ariel .
- (4) CASTANY, G. Tratado Práctico de las aguas subterráneas Ed. Omega.
- (5) ORELLANA, E. y MOONEY H. P. Curvas Patrón para 2, 3, y 4 terrenos. Editorial Interciencia 1966.
- (5) PYLAEV C. G. Colección de Curvas Patrón para conjuntos de hasta 4 terrenos.
- (6) COMPAGNIE GENERAL DE GEOPHYSIQUE: Serie de Curvas Patrón para 2,3, y 4 terrenos.
- (7) ORELLANA, E. La prospección geoelectrica con corrientes continuas.
- (8) KELLER, G. V. y FRESCHKNECHT, Electrical Methods in Geophysical Prospecting PERGAMON PRESS (1966).