

1. Parte

1.1. Autopotencial

El método del autopotencial o polarización espontánea se basa en la medida de las diferencias de potencial que existen entre dos puntos cualesquiera del terreno. Según esto, si dos varillas de metal enterradas en el terreno se conectan a un galvanómetro o un voltímetro sensible, se observará una tensión. Esta tensión puede ser de unas fracciones de milivoltio hasta centenares de milivoltios. Tales diferencias de potencial constituyen una ayuda geofísica aprovechable en la prospección geoelectrónica.

En contraste con la mayoría de los métodos geofísicos prospectivos, el autopotencial estudia campos naturales por lo que no necesita de la introducción de energía en el terreno. Potenciales grandes de varios centenares de milivoltios, y hasta de 1,5 voltios, revelan la presencia en el subsuelo de cuerpos que actúan como baterías, dando origen a corrientes eléctricas. Generalmente los potenciales grandes se obtienen sobre depósitos de algunos sulfuros como pirita, pirrotita, calcosina, etc., ciertos óxidos como magnetita, pirolusita, etc., minerales o rocas carbonosas como grafito, antracita, etc. Hasta el momento los potenciales más intensos han sido obtenidos sobre depósitos de pirite, pirrotita y grafito. Los minerales que forman estos yacimientos poseen una conductividad electrónica metálica, requisito necesario para la formación

de las anomalías. Las rocas asociadas al cuerpo mineralizado poseen una conductividad iónica electrolítica.

1.2. Causas del autopotencial

Los autopotenciales pueden clasificarse en dos grupos:

- 1) Los potenciales de fondo, de fracciones de milivoltio hasta decenas de milivolts, de polaridad positiva o negativa. Estos son los potenciales de difusión, potenciales de filtración, etc. El origen de estos potenciales parece ser bien conocido. Ejemplo: La diferencia de potencial entre dos electrolitos de diferente concentración puestos en contacto.
- 2) Los potenciales de mineralización, con valores máximos de varios centenares de milivolts. Estos potenciales, que tienen un origen indudablemente electroquímico, son muy difíciles de explicar ya que el mecanismo de sus reacciones no está muy bien definido. Sobre este tema se han escrito muchos trabajos, pues para la prospección geofísica son los de mayor interés.

De los trabajos de Schlumberger (1922), Heiland (1940), Poldini (1941), Kelly (1945), Friesch (1949), Jakosky (1950), Meißner (1952), Milizer (1953), Eve-Reys (1954), Wilckens (1956), etc. se deducen los requisitos que dan origen al autopotencial:

a) Oxidación en parte de los cuerpos mineralizados. Rocas muy sanas y compactas no dan autopotencial; lo mismo ocurre cuando las capas están congeladas ya que el congelamiento impide el movimiento iónico. Zonas desérticas tampoco son favorables para la aparición del fenómeno, entre otros motivos por la falta de humedad.

- b) Diferencias en la composición química de las soluciones que están en contacto con el cuerpo mineralizado. Diferencias en el valor pH del agua subterránea a distintas profundidades.
- c) Cuerpos formados por una faja continua de mineralización muy buenos conductores. Una metalización diseminada puede producir autopotencial si la separación entre los granos es pequeña y la conducción entre ellos, bajo ciertas condiciones, se hace iónica.
- d) La presencia de ciertos minerales como pirita, grafito, etc.
- e) Buena conductividad de las rocas asociadas al cuerpo mineralizado.

De los mismos trabajos se deducen también las condiciones para poder medir las anomalías:

- 1) La capa de cubierta no debe ser aislante
- 2) Las anomalías de los cuerpos mineralizados deben diferenciarse plenamente de las formadas por las rocas de las inmediaciones
- 3) El cuerpo mineralizado debe encontrarse en parte bajo el nivel freático y en parte sobre él

Casi todas las teorías sobre el origen de los autopotenciales se basan en la oxidación de los cuerpos mineralizados con una u otra variación. Sato y Rooney (1960) expusieron las teorías que trataban de explicar el fenómeno del autopotencial.

Primera teoría. "La oxidación de los cuerpos mineralizados, como los sulfuros, son los causantes del autopotencial".

Jakosky (1950), Eve y Keys (1954), Brand (1955) y otros.

Segunda teoría. "La oxidación de los cuerpos mineralizados es la primera condición para la formación de los autopoten-

ciales". Heiland (1940), Kelly (1945), Dobrin (1952), Wilkens (1955) y otros. En esta teoría juega un papel muy importante la humedad del suelo, la diferencia en acidez de las aguas superiores o inferiores al nivel freático, etc.

Tercera teoría. "La oxidación de los cuerpos mineralizados no influye en el autopotencial". Schlumberger (1922) y otros. Esta teoría atribuye el autopotencial a electro-ósmosis, potenciales de difusión, corrientes telúricas, electrofiltración, etc.

Sato y Mooney (1960) después de analizar estas teorías, proponen una nueva de donde se deducen las siguientes conclusiones:

- a) Los cuerpos mineralizados que dan lugar a la formación del autopotencial poseen una conductividad electrónica metálica.
- b) Las anomalías del autopotencial son siempre negativas en la proximidad del extremo superior del cuerpo.
- c) El valor de las anomalías es de algunos centenares de milivoltios y puede llegar hasta 0,5 voltios.
- d) Parte del cuerpo debe encontrarse en una zona de oxidación y parte en una de reducción.
- e) El autopotencial es estable con el tiempo.
- f) La acidez de las aguas por encima del nivel freático, cerca de un depósito de sulfuros, suele ser de $pH=2$ a 5 , con mucho oxígeno libre. Por debajo del nivel freático no se encuentra oxígeno libre y las aguas presentan una reacción ligeramente básica, $pH=7$ a 9 .
- g) Los potenciales de fondo pueden causar perturbaciones en las mediciones, pero no son las causas de las anomalías principales.

n) Los autopotenciales no se deben directamente a la oxidación de los cuerpos mineralizados.

Sobre estas conclusiones se debe indicar que se han encontrado anomalías positivas en las cercanías del techo de cuerpos mineralizados, anomalías con intensidades superiores a 1,5 voltios y potenciales elevados, incluso cuando el yacimiento está completamente recubierto por el nivel freático.

1.3. Autopotenciales en depósitos de pirita y grafito.

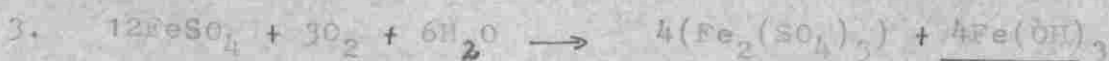
Los procesos químicos en un yacimiento de pirita se pueden representar por las siguientes reacciones químicas, según Petraschek (1950).



El sulfato de hierro resultante se disuelve rápidamente en la naturaleza formando el sulfato férrico que no es fácil de disolver.



Si el ácido sulfúrico de la reacción 1. se liga rápidamente a otros minerales, entonces tenemos la reacción 3.



De esta reacción se forma una solución finamente dispersa de hierro que se convierte en Goethita y ésta no es fácil de disolver.

De esta manera se origina un electrodo de óxido en la zona de oxidación, encima del nivel freático, cuyo potencial depende de la concentración de iones de metal que el electrodo

de óxido pueda entregar, es decir, de la solubilidad del óxido. Ya que la solubilidad depende entre otros valores del pH de los electrolitos que rodean el cuerpo, entonces el potencial del electrodo será una función del valor pH de los electrolitos. Según la ley de Nernst, esto equivale a que el electrodo de óxido se carga positivamente y los electrolitos negativamente. A mayor profundidad bajo el nivel freático, donde el cuerpo mineralizado se encuentra relativamente sano, éste se carga negativamente; de esta manera se obtiene una asimetría tanto en el cuerpo mineralizado como en los electrolitos que lo rodean, dando lugar a la formación de una cadena galvánica de las siguientes características, según Wilckens (1955):

- sulfato de / solución (pH=8) / solución (pH=3) - / óxido de +
hierro y rocas asociadas y rocas asociadas hierro
zona de reducción zona de oxidación

Si denominamos por V cualquiera de los potenciales de esta cadena, entonces para la fuerza electromotriz tendremos:

Metal a / Electrolito 1 / Electrolito 2 / Metal b

con las faces a, b, 1, 2.

Fuerza electromotriz = $(V_a - V_1) + (V_1 - V_2) + (V_2 - V_b)$

" " = $(V_a - V_b)$

Esto nos indica que para la fuerza electromotriz de la cadena sólo la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo serían de interés primordial, mientras que los potenciales de electrodos y de difusión jugarían sólo un papel secundario.

Para los yacimientos de grafito Wilckens (1955) parte del mismo modelo utilizado para los yacimientos de pirita. Debido

a que el grafito no suele oxidarse en condiciones normales del terreno Wilckens supone, como única solución, la formación de un óxido superficial básico en la superficie del grafito, como el formado, el carbono está en contacto directo con el aire a temperatura de laboratorio. Con esta capa de óxido la parte superior del cuerpo de grafito funciona como un electrodo de oxígeno. Desafortunadamente no se sabe cómo el oxígeno puede reaccionar electromotóricamente. En electrodos carbón-aire, el carbón activo, con una superficie mas grande que la del grafito, acelera catalíticamente la reacción $1/2O_2 + 2H_3O^+ + 2e^- \rightarrow 3H_2O$. Según el autor, este proceso posiblemente se cumple en las partes superficiales de un depósito de grafito, pero hay que tener en cuenta que en esas regiones no existe carbón activo sino un grafito de cristales burdos de poca superficie. También hay que considerar que gases sólo en electrodos secos reaccionan electromotóricamente. Según esto hay que suponer que el óxido formado en la primera reacción obra electromotóricamente, formando así un electrodo de óxido cuyo potencial depende del valor pH de los electrolitos que lo rodean y cuya cadena galvánica sería:

- grafito/ soluciones y / soluciones y / grafito, $O_2 +$
rocas asociadas rocas asociadas
zona profunda zona superficial

en donde el electrodo de oxígeno y de óxido se cargarían positivamente. Muchas veces en los depósitos de grafito se encuentra también pirita, formando una cadena de las siguientes características:

- cuerpo mezclado/ solución Fe^{2+} / solución Fe^{3+} / cuerpo mezclado +
zona profunda zona superficial

(Ver figure, página 16)

Sato y Mooney (1960) refutan en parte estos modelos, por los siguientes motivos:

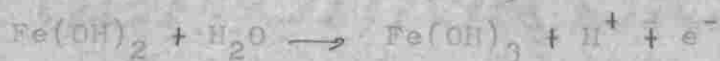
- 1.) Con la oxidación del cuerpo mineralizado el cuerpo desaparecería con el tiempo debido a la constante pérdida de energía necesaria para mantener las corrientes eléctricas. Los cuerpos productores de autopotencial se hallan dentro de un dominio de inmunidad y no toman parte en las reacciones químicas y se limitan a actuar como conductores electrónicos.
- 2.) Aun cuando el grafito no se oxida, estos yacimientos muestran con frecuencia grandes autopotenciales.
- 3.) Si el cuerpo en las partes superficiales pierden electrones, cuya carga es negativa, se cargarían positivamente, mientras que, según las experiencias del campo, casi siempre ocurre lo contrario.

Estos autores proponen el siguiente modelo, válido para los yacimientos de pirita y grafito:

Un cuerpo productor de autopotencial se encuentra en dos zonas diferentes cuyo límite es el nivel freático. Las reacciones que se originan son por tal motivo electroquímicas pero de diferente carácter. El cuerpo mineralizado sirve únicamente como conductor de electrones, cuyo flujo de las partes profundas a las superficiales hace que las reacciones químicas puedan mantenerse indefinidamente y no interviene en las reacciones, por lo que permanece inalterable. Las soluciones que se encuentran sobre el nivel freático, rodeando el cuerpo, son reducidas debido a que se encuentran relativamente oxidadas. Las soluciones bajo el

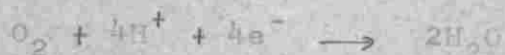
el nivel freático sufren una oxidación pues se encuentran reducidas. En los extremos superior e inferior del yacimiento tiene lugar un intercambio de cargas iónicas y electrónicas. Por lo tanto los autopotenciales no pueden ser producidos directamente por la oxidación del mineral próximo a la superficie, sino a diferencias del potencial de oxidación (Eh) de los electrolitos sobre el nivel freático respecto a los situados bajo él. Para establecer el equilibrio eléctrico debido al intercambio de electrones, en las rocas asociadas al yacimiento, iones positivos fluyen hacia las zonas superficiales y negativos a las zonas profundas. La energía necesaria para el mantenimiento del proceso es suministrado por el oxígeno disuelto en el agua.

En las zonas profundas las reacciones de oxidación más probables son aquellas en las que interviene el ion ferroso y el hidróxido ferroso.

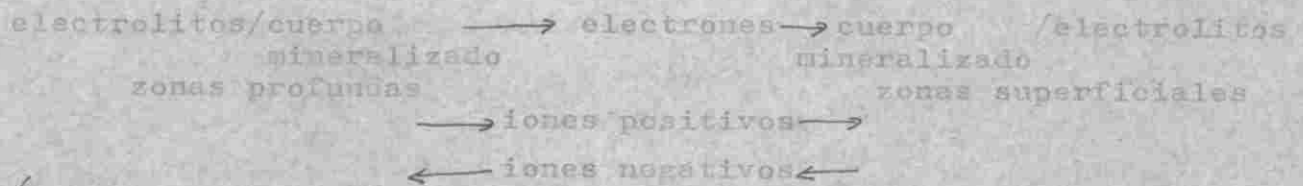


Los electrones libres de estas oxidaciones fluyen a través del cuerpo a las zonas superficiales, donde se les necesita para las reacciones de reducción.

En las zonas superficiales las reacciones de reducción más probables son las que afectan el oxígeno libre y el ion férrico.



La cadena formada sería entonces:



(Ver Figura, página 16)

1.4. Mediciones del autopotencial

Para las mediciones del autopotencial se necesitan sondas, cables y un voltímetro.

Como sondas se usan generalmente las llamadas sondas impolarizables, pero también pueden servir varillas de metal.

Las varillas de metal tienen el inconveniente de sufrir el fenómeno de polarización, que tiende a enmascarar la diferencia del potencial natural entre las sondas. Este fenómeno, que debe su origen entre otros factores a las diferencias de humedad en el terreno, puede tener un valor hasta de 100 milivoltios.

Las sondas impolarizables más sencillas constan de una varilla de cobre dentro de un vaso de porcelana porosa que contiene una solución saturada de sulfato de cobre. Estas sondas muestran todavía una diferencia de potencial (potencial de interface) pero de sólo unos pocos milivoltios.

Los potenciales se miden conectando las sondas a un voltímetro de lectura directa o de compensación. Cuando se usan voltímetros de lectura directa estos deben constar de una resistencia interna muy alta a fin de evitar el paso de corriente por el aparato. A estos aparatos también se les puede conec-

tar resistencias externas, pero con el inconveniente de no medir exactamente los potenciales naturales debido a la pérdida de energía consumida por las resistencias pasivas. Hoy día, para los trabajos de autopotencial, se utilizan los potenciómetros o compensadores de corriente continua, que determinan la tensión entre las sondas, equilibrándola con otra tensión conocida.

Para las mediciones se usan cables de cobre liviano con envoltura aislante.

Para medir el autopotencial en las prospecciones se pueden utilizar dos métodos. En el primero una sonda permanece fija (sonda base) mientras que la otra es transportada a diferentes puntos (sonda móvil), situados por lo general a lo largo de un perfil. En cada punto se lee la diferencia de potencial, pero teniendo cuidado de anotar la polaridad del potencial. Por regla general la polaridad del potencial es la del signo del voltímetro al que hay que conectar la sonda móvil para que la tensión leída sea positiva. El segundo método usado es el del gradiente del potencial. En este método las dos sondas se desplazan a lo largo de un perfil guardando una separación constante entre ellas, de tal manera que la sonda trasera ocupe la posición ocupada por la sonda delantera en cada medida. En este método también hay que tener en cuenta la polaridad del potencial, para lo cual se usa la misma regla.

1.5. Autopotenciales en las galerías de minas

En las mediciones de autopotencial, tanto en la superficie como en las galerías, no se mide toda la cadena galvánica sino parte de ella.

Medidas en galerías de minas han sido objeto de trabajos de investigación como los de Meißer(1952), Militzer(1953), Wilckens(1955), etc. En estos trabajos las medidas se utilizaron para correlacionarlas con las efectuadas en la superficie. El método utilizado en estos trabajos fue el de la sonda base y sonda móvil, con intervalos entre ellas de 20 metros, por lo cual fue necesario medir en perfiles de cientos de metros de longitud. En estos trabajos falta el estudio del autopotencial en fallas y áreas cercanas a ellas, con intervalos entre las sondas menores de un metro.

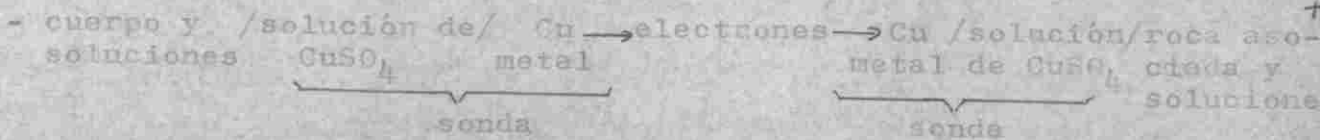
Según estos autores los resultados obtenidos de mediciones en la superficie son más precisos que los obtenidos en las galerías. Esto se debe a las distancias entre las sondas, cambios de humedad, puntos de explotación, etc. Estos factores, que no se pueden evitar, hacen el trabajo difícil e influyen en las mediciones, haciendo las correlaciones imprecisas.

Estos mismos autores recomiendan trabajar en la interpretación con intensidades mayores de 30 milivoltios, debido a que las lecturas en las galerías son mayores por existir un contacto directo con el cuerpo polarizado.

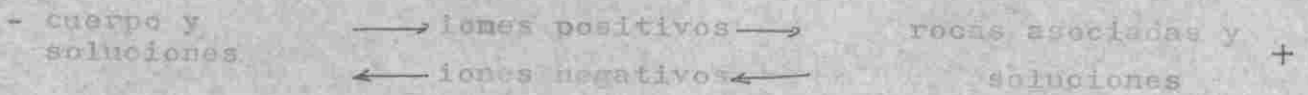
La cadena formada durante una medida en galería está compuesta

de dos partes. Si se trabaja con sondas insolarizables y se supone una polaridad negativa para el cuerpo mineralizado, la cadena se puede representar de la siguiente manera:

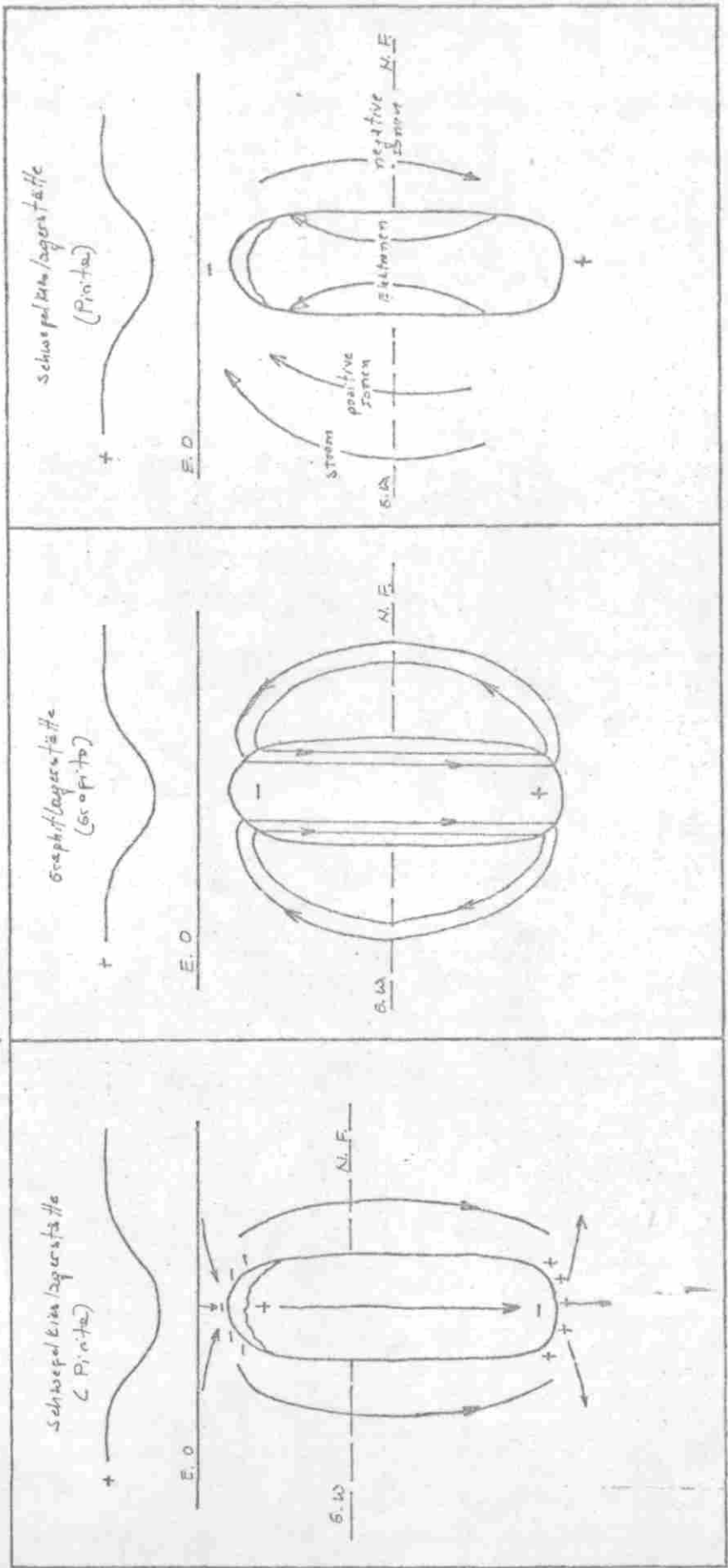
1. Cadena artificial:



2. Cadena natural:



Discussion des autopotential 7 de la courbure
Eigenpotential- und Stromverteilung



a) Mirtar

b) Wilkens

c) Sato und Mooney