

Adquisición aérea EM.



## MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

*... "Gin a body meet a body  
Flyin' trhough the air.  
Gin a body hit a body,  
Will it fly? And where? (...)  
"Ilka problem has its method  
By analytics high;  
For me, I ken na ane o'them,  
But what the waur am I?" ...*

[... "Si un cuerpo halla un cuerpo  
Volando por el aire.

Si un cuerpo le da a un cuerpo,

¿Volará? ¿Y dónde? (...)

"Todo problema tiene método

Por análisis superior;

Para mi, no conozco ninguno,

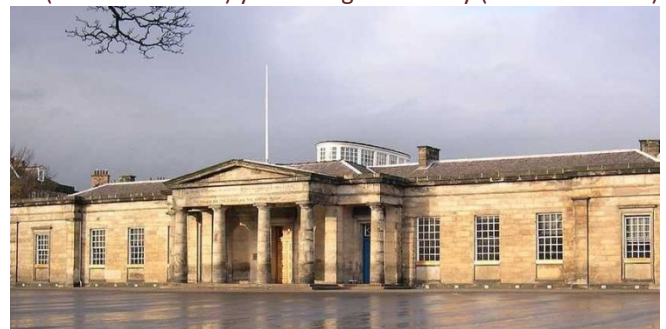
¿Pero qué tan astuto soy?"...]

James Clerk Maxwell (circa 1855)

Con su madre y su padre provenientes de familias tradicionales escocesas, James nació en Edimburgo en 1831 y pasó su infancia en un caserón de estancia (Glenlair) en la campiña del sur de Escocia. Una hermanita falleció muy pequeña y su madre murió de cáncer abdominal cuando él tenía ocho años. A la edad de diez volvió a la capital a estudiar en la Academia y posteriormente en la Universidad. Se casó a los veintisiete y su esposa –a quien dicen que adoraba– lo ayudó siempre en el laboratorio. No tuvieron hijos.

Genio polifacético, Maxwell sintetizó los estudios previos de electricidad y magnetismo y formuló la visión unificada de ambos campos físicos. Pero además estudió la estadística cinética de los gases (en paralelo con el alemán **Ludwig Boltzmann**), también hizo importantes estudios de óptica, sobre el color y la visión, planteó cuestiones relativas al origen del sistema Solar y propuso que los anillos de Saturno –las misteriosas orejas que había visto **Galileo Galilei**– en verdad están constituidos por una miríada de fragmentos. Y hasta se dio tiempo para la poesía, a veces irónica, como la letra que le cambió a la vieja canción infantil “*Comin’ thro’ the rye*” de Robert Burns.

Glenlair House (foto Stuart Reid) y Edinburgh Academy (foto MacUmba)



En la rica historia del electromagnetismo también debemos citar al serbio **Nikola Tesla**, quien, como **Lorand Eötvös** e **Isidor Rabi**, nació dentro de los confines del Imperio austrohúngaro (que habría de desintegrarse tras la derrota en la Primera Guerra Mundial, igual que el Imperio otomano). Tesla –que era un bebé cuando Maxwell ya tenía 25 años– estudió en las universidades de Graz y Praga, trabajó en Budapest y París, y luego, tras cruzar el gran charco, entre 1884 y 1900 desarrolló en Estados Unidos investigaciones tecnológicas diversas que, entre otras numerosas aplicaciones, permitieron surgir toda la hoy indispensable tecnología de corriente alterna, base del confort. Y lo hizo contrariando a su primer patrón y rival científico, un rico que lo perjudicó con alevosía, el estadounidense **Thomas Edison**, quien como espectáculo público hizo electrocutar un elefante y además patrocinó la invención de la silla eléctrica (la primera ejecución fue cruelmente larga) para

así mostrar el peligro del empleo de ese tipo de corriente a favor de su empresa de corriente continua (luego General Electric) en contra de Westinghouse, adonde se había pasado exitosamente Tesla –que sin embargo murió pobre–. Hoy su apellido da nombre a lujosos coches eléctricos, uno de los cuales transita en forma elíptica en torno al Sol desde la órbita terrestre hasta más allá de la de Marte, con un monigote al volante.

Cuando **James Maxwell** en 1861 publicó *On physical lines of force* consiguió completar el integral entendimiento del campo electromagnético (EM), cuyos brillantes planteos teóricos habrían de ser demostrados experimentalmente por el alemán **Heinrich Hertz** hacia 1886, siete años después de la muerte de Maxwell (de cáncer abdominal a los cuarenta y ocho, idéntica edad y patología que su madre).

Las componentes eléctrica y magnética se hablan. Oscilan ortogonalmente a la dirección de propagación del campo EM y a su vez lo hacen en planos perpendiculares entre sí. Las ya citadas ecuaciones vinculadas por Maxwell, todas a partir de integrales de bucle, formulan los siguientes conceptos fundamentales:

**Ley de Gauss** (1835):  $\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$       donde  $\mathbf{B}$  es el flujo magnético  
para el campo magnético (dice que las líneas de inducción magnética son continuas, no hay polos aislados)

**Ley de Gauss** (1835):  $\oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q$       donde  $\mathbf{D}$  es la Inducción electrostática y  $q$  la carga  
para el campo eléctrico (manifiesta que las líneas de campo eléctrico pueden ir de una a otra carga)

**Ley de Faraday - Lenz:**  $\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -d\mathbf{B}/dt$       donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico y  $t$  el tiempo  
(1831-33) (enuncia que un campo magnético variable produce un campo eléctrico opuesto)

**Ley de Ampère** (1826):  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{s} = \mathbf{J} + d\mathbf{D}/dt$       donde  $\mathbf{H}$  es el campo magn. y  $\mathbf{J}$  la densidad de corriente  
(expresa que un campo eléctrico variable genera un campo magnético desfasado)

Teniendo presente que  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$  y que  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$

Maxwell descubrió además que la velocidad de la luz en el vacío está dada por:  $c = 1/(\epsilon_0 \mu_0)^{1/2}$

(recordamos que  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética y  $\epsilon_0$  es la constante dieléctrica, ambas en el vacío)

Téngase en cuenta que la velocidad de propagación de los fotones en el vacío es de 299.792 km/s, en el aire de 299.705, en el agua de 224.844, en el cuarzo –densidad 2,65 g/cm<sup>3</sup>– de 194.166 y en un material muy denso como el diamante –3,52 g/cm<sup>3</sup>– de 124.034 km/s.

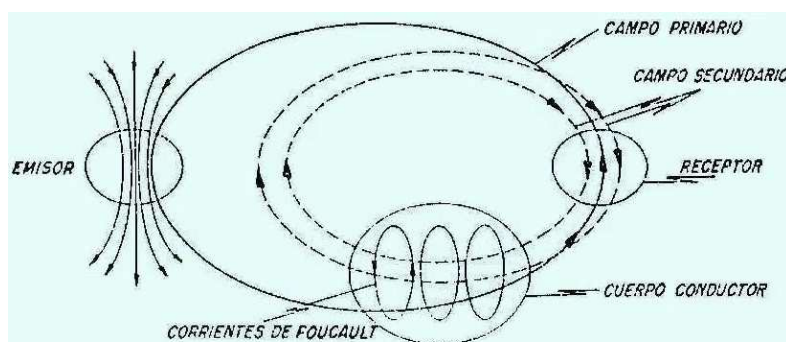
También recuérdese que la regla de la mano derecha o del sacacorchos para el producto vectorial aplicado al EM establece que, si el dedo pulgar da el sentido de una corriente eléctrica, el índice da la del campo magnético y el mayor (ortogonal a los anteriores) da el sentido de la FEM (fuerza electromotriz) inducida.

## FUNDAMENTOS DE LA PROSPECCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

**Jagadis Bose**, nacido en Bangladesh (en bengalí, país de Bengala) fue un adelantado en la investigación de ondas EM en Calcuta (India) y en 1894 hizo la primera emisión telegráfica sin hilos, que no patentó. Fue un logro que en 1897 también alcanzó el italiano **Guglielmo Marconi**, que sí lo divulgó y comercializó. Bose también inventó el más primitivo diodo semiconductor e hizo experiencias pioneras de ondas cortas.

Pero los métodos prospectivos fueron desarrollados inicialmente por la *Svenska Skolan* (Escuela Sueca) desde la década de 1920, aunque también por geofísicos rusos, estadounidenses, canadienses y de otros países. Los investigadores suecos **Hans Lundberg** y **Karl Sundberg** fueron entre los años 1919 y 1932 los principales desarrolladores de los fundamentos de los métodos de cateo electromagnético.

Estos métodos se basan en generar un campo EM variable a través del flujo de una corriente alterna por una bobina (inglés, *coil*) o un cable muy largo llamado **emisor** (*emitter*) o **transmisor** (*transmitter*). El campo generado se llama **campo normal o primario**. Éste habrá de inducir corrientes eléctricas alternas o FEM en cualquier conductor que encuentre en su camino de propagación: se trata de las **corrientes de remolino** (*eddy currents*) o de Foucault (porque fue el francés **León Foucault**



Campo primario generado por un emisor y campo secundario inducido por la presencia de un cuerpo conductor.

(modificado de Cátedra Geofísica Universidad Nacional de Cuyo)

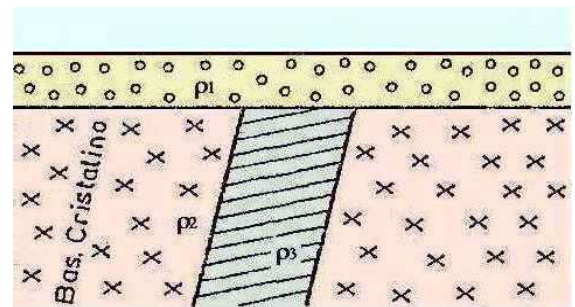
quien en torno a 1850 comprendió su origen). La intensidad de estas corrientes dependerá fundamentalmente de la resistividad del conductor y de la frecuencia del campo primario, es decir que **su intensidad será mayor cuanto menor sea la resistividad y cuanto más alta sea la frecuencia.**

Las corrientes inducidas en el conductor tienen una dirección tal que el **campo secundario** que generan adopta un sentido opuesto al primario, según la Ley de (**Heinrich**) **Lenz** (físico ruso, nacido en Tartu, actual Estonia). El estadounidense **Louis Slichter** en 1932 evaluó los fundamentos de este tipo de prospección.

La frecuencia de la corriente alterna primaria se selecciona de tal manera que el campo electromagnético inducido por la presencia de las corrientes de remolino en el suelo sea insignificante cuando el subsuelo tenga una conductividad normal. Esto lleva a un límite superior cercano a los 5.000 hertz o hercios (ciclos por segundo) para la frecuencia de operación, dentro del rango de *VLF (Very Low Frequency)*, lo que implica una longitud de onda del orden de unos 60 km. Sin embargo en algunas prospecciones se registra con frecuencias de hasta unos 50 KHz (ya dentro del rango de baja frecuencia o *LF*). E incluso se han concebido variantes específicas que recurren a altas (*HF*), muy altas (*VHF*) o ultra altas frecuencias (*UHF*). En cualquier caso, **los campos primario y secundario dan un campo resultante que se mide con un receptor (receiver)**, que consiste en una bobina conectada a un amplificador electrónico sensible.

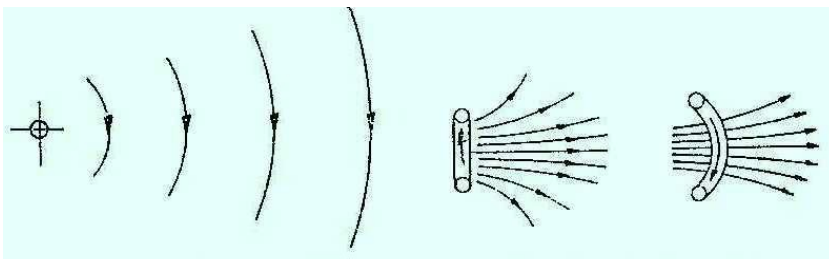
Actualmente la prospección electromagnética o inductiva se aplica a muy variados objetivos, incluyendo la detección de acuíferos con distintas salinidades en tareas hídricas o ambientales. Pero las áreas donde se originaron estos métodos son las que suelen presentar las **mejores condiciones para su aplicación**: topografía suave, encape superficial de alta resistividad y roca cristalina no alterada. Si en tal contexto favorable existen mineralizaciones que se presentan como cuerpos tabulares casi verticales con más de un 25% de contenido de sulfuros metálicos, entonces las conductividades anómalas pueden llegar a ser más de 1.000 veces superiores a las que registra la roca de caja, como sucede en el arcaico escudo Fenoscándico (900 a 3.400 millones de años) en torno al mar Báltico, donde por primera vez se comenzaron a aplicar estos métodos (esquema adyacente).

Naturalmente no son necesarios contrastes tan elevados en el emplazamiento y pueden presentarse otras relaciones geométricas de muy variado origen que sean de interés prospectivo. Pero **es importante no tener un encape conductivo porque, de haberlo, su alta respuesta tenderá a minimizar la respuesta de los conductores más profundos**, circunstancia tanto más perniciosa cuanto mayor sea la frecuencia del campo primario que sea aplicado.



Condiciones ideales de aplicación de los métodos electromagnéticos:  $\rho_1 \gg \rho_2 > \rho_3$

(figuras modificadas de Cátedra Geofísica U. N. Cuyo)



Campo electromagnético generado por un cable.

Campo electromagnético generado por una bobina.

En cada punto del espacio habrá una intensidad eléctrica y habrá otra magnética oscilando ortogonalmente entre sí. En ausencia de conductores en el subsuelo, el campo EM en cada punto oscilará a lo largo de una línea y se puede representar por un vector cuya magnitud dará la amplitud del campo. La dirección de éste dependerá de la posición relativa del

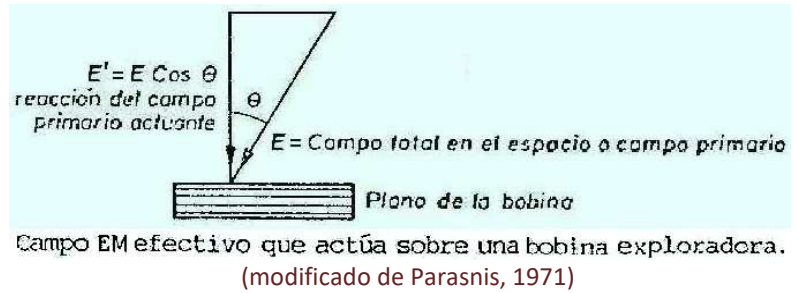
transmisor y del punto de observación. Por ejemplo, las líneas del campo debidas a una bobina fuente (emisora) son diferentes de las originadas en un cable largo emisor, como se ilustra a la izquierda.

Los físicos franceses **Jean Biot y Félix Savart** determinaron en 1820 la relación que existe entre la intensidad *I* de una corriente rectilínea e indefinida (en la práctica un cable largo) y el campo magnético *B* creado por ella a una cierta distancia *r*:  $B = \mu_0 I / 2\pi r$

En el caso de una bobina emisora se deduce que:  $B = \mu_0 I a / 2\pi r^2$  (*a* es el área de la bobina)

Para detectar un campo electromagnético en el espacio se puede utilizar una bobina que es denominada receptora o exploradora, cuyos terminales van conectados a un amplificador y de ahí a un par de auriculares o a cualquier otro sistema indicador de corriente alterna. El voltaje inducido en la bobina por un campo magnético alterno es proporcional a la componente de ese campo que es perpendicular al plano de la bobina,

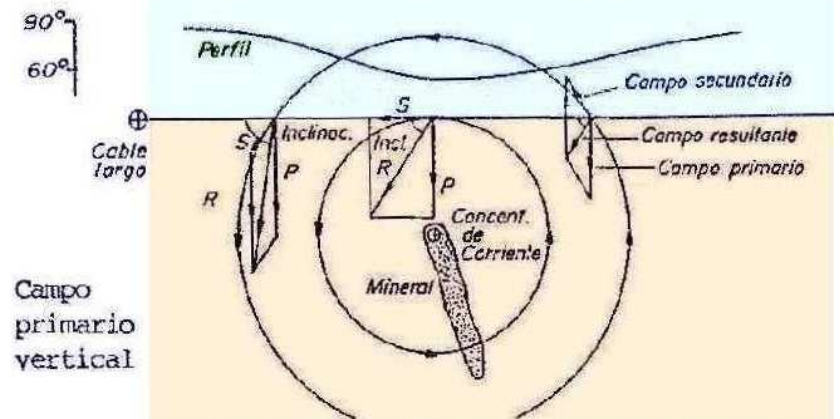
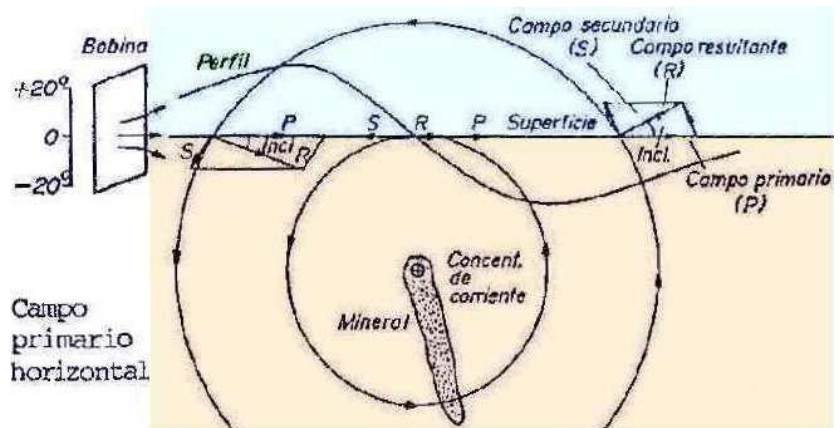
tal como se ve en la figura a la derecha. Consecuentemente habrá posiciones definidas de la bobina con respecto al campo primario que harán que la señal sea máxima, mínima o intermedia. Así, cuando el vector campo primario  $B_p$  sea perpendicular al plano de la bobina, el ángulo  $\theta$  será igual a  $0^\circ$  y como consecuencia la tensión inducida en la bobina será máxima –porque los vectores eléctrico y magnético son mutuamente normales–, lo cual se manifestará con una señal de salida en el indicador (auriculares o lector digital). Por otra parte, cuando el ángulo  $\theta$  sea igual a  $90^\circ$ , o sea cuando el vector campo primario  $B_p$  (que en adelante llamaremos  $P$ ) esté en el plano de la bobina, no habrá campo magnético atravesándola, no se inducirá voltaje alguno y la señal registrada será nula. Habrá un número infinito de posiciones de la bobina receptora para las cuales el ángulo  $\theta$  será de  $90^\circ$  y la señal resultará cero. Esto se debe a que el vector campo primario  $P$  continuará en el plano de la bobina cuando ella se haga rotar alrededor del diámetro que coincide con la dirección del campo.



En el caso en que un conductor esté presente en el subsuelo y genere un campo magnético alterno secundario  $B_s$  (que llamaremos  $S$ ), el vector campo resultante  $B_R$  (en adelante  $R$ ) en cualquier punto describirá una elipse en un plano bien definido: el campo estará elípticamente polarizado. Será equivalente a dos vectores perpendiculares oscilantes, uno a lo largo del eje mayor de la elipse y el otro a lo largo del eje menor. Igual que antes, cuando el campo resultante  $R$  coincida con el plano de la bobina la señal será nula, pero a diferencia de antes –cuando sólo teníamos al campo primario y había infinitas posiciones de señal nula–, en este caso habrá sólo una posición de la bobina para la cual el voltaje inducido sea cero: aquella en la que el plano de la elipse de polarización coincida con el plano de la bobina receptora.

Para encontrar tal plano de polarización en la práctica debe procederse a rotar la bobina receptora alrededor de un eje vertical hasta que la señal resulte mínima, luego ha de rotarse en torno de un eje horizontal hasta que pueda encontrarse otra mínima y finalmente se debe rotar respecto de un eje normal a los otros dos hasta que la señal se anule. Después, para poder conocer la orientación del eje mayor de la elipse de polarización, la bobina exploradora debe orientarse sobre uno de los planos ortogonales al de silencio (el que no sea de máxima señal) y luego se la debe girar hasta tener la mayor señal relativa: en ese momento el eje mayor de la citada elipse coincidirá con la perpendicular al plano de la bobina.

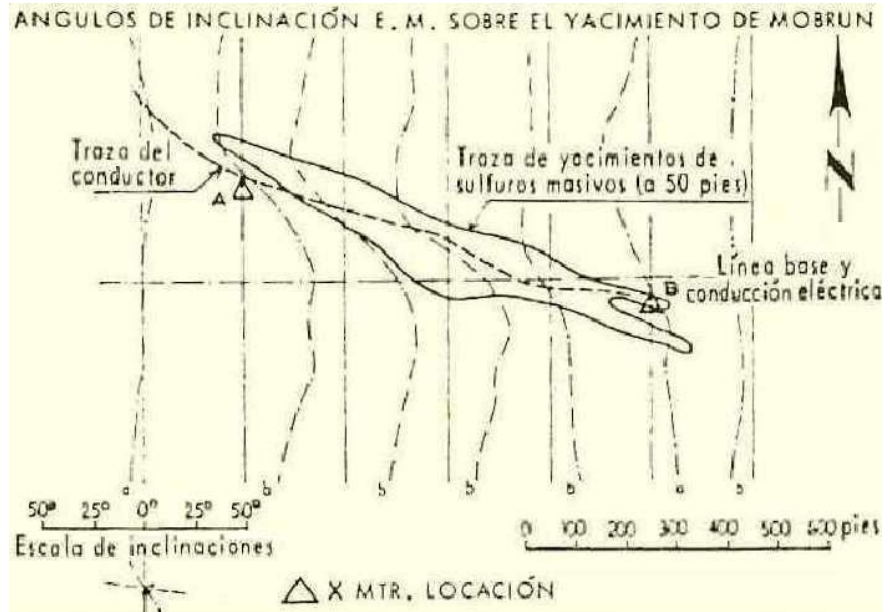
Se llama **inclinación (tilt) del campo EM** al ángulo formado por el eje mayor de la elipse de polarización con la horizontal y fue el concepto aprovechado por la primera técnica de prospección electromagnética que se empleó: el **Método de Inclinación de Campo**. En éste se opera del modo arriba descrito, buscando máximo sonido y máximo silencio en la bobina exploradora para así poder hallar la ubicación de la elipse de polarización y la inclinación de su eje mayor.



Inclinación del campo electromagnético  
 (modificado de Parasnis, 1971)

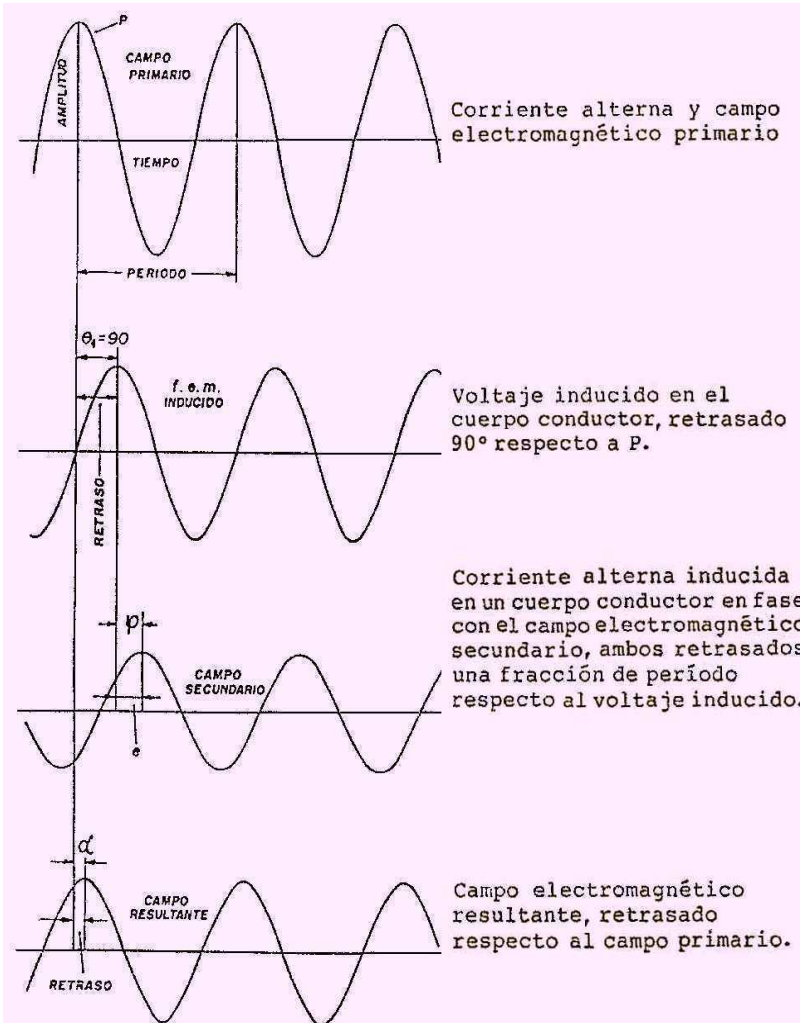


Observador del campo electro-magnético operando con la bobina exploradora durante la adquisición del método de inclinación de campo (foto BGAB)



Prospección por el método de inclinación de campo en Quebec, Canadá, con equipo de Sharpe Instruments (modificado de Parasnis, 1971)

También se registra de esta forma con el método magnetotelúrico de Afmag, referido en el Tema 06 (pág.137), aunque ese caso aprovechando el campo natural de audiofrecuencias magnéticas (dentro del rango audible para el ser humano, de bajas frecuencias o *LF*).



(modificado de Parasnis, 1971)

### Naturaleza de las anomalías electromagnéticas

Si se hace fluir una corriente alterna a través de una bobina se originará un campo electromagnético primario que estará en fase con dicha corriente y que podrá representarse por una senoide en la que *P* será su amplitud. Si este campo actúa sobre un conductor (por ejemplo roca con pirita,  $FeS_2$ ), se inducirá un voltaje oscilante que estará atrasado un cuarto de periodo ( $90^\circ$ ) con respecto al campo primario (ley de Faraday-Lenz). A su vez la corriente inducida en el conductor se atrasará respecto al voltaje inducido y su retraso (*delay*) dependerá de la resistencia del cuerpo conductor en subsuelo. El campo EM secundario inducido por esta corriente alterna estará en fase con ella, o sea que estará atrasado respecto al voltaje (ley de Ampère).

**El campo resultante en un punto cualquiera del espacio será la suma de los campos primario y secundario, es decir, la curva resultante de la suma de la primera y la tercera. Este campo tendrá diferente amplitud que la del campo primario y además estará retrasado temporalmente una fracción  $\alpha$  de períodos respecto a él.**

En general puede expresarse que en el **emisor** será la intensidad:  $I = I_0 \cdot \text{sen}(\omega t)$

y en el **receptor** resultará:  $I = I_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \alpha)$  con un retraso de fase  $\alpha$

y frecuencia angular o pulsación  $\omega = 2\pi \cdot f$  (f es la frecuencia)

**Diagrama vectorial**

Lo expresado precedentemente puede ser representado a través de un diagrama vectorial, transformando la diferencia de fase en una relación de atraso temporal entre el campo primario, el secundario y el resultante de ellos, tomándose como convención el sentido contrario a las agujas del reloj para indicar un retraso relativo, como se ilustra a la derecha. Véase que se considera al campo primario P como un vector que yace sobre el eje x, siendo OA la amplitud del mismo durante una oscilación. La FEM (fuerza electromotriz, aunque en rigor no es una fuerza) inducida en el conductor (corrientes de remolino o *eddy*), al estar retrasada  $90^\circ$  o  $\pi/2$  (desfasaje en cuadratura) con respecto al campo primario, podrá representarse por el vector AB de la figura precedente.

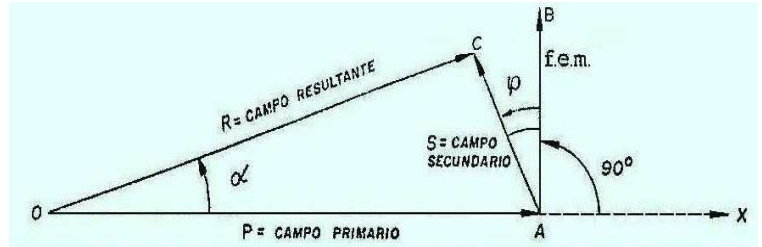


Diagrama vectorial que representa las relaciones de fase entre los campos primarios, secundarios y resultante.

(modificado de Parasnis, 1971)

Como la corriente inducida en el conductor está atrasada respecto a la FEM y a su vez el campo secundario está en fase con dicha corriente, la representación del campo secundario corresponde al vector AC del diagrama siendo  $\phi$  el ángulo de retraso de este respecto a la FEM inducida. Además el vector AC representará la amplitud del campo secundario durante una oscilación.

Se ha dicho previamente que la diferencia de fase entre la FEM y la corriente inducida dependen de la conductividad del cuerpo, siendo mayor cuanto más conductivo es el mismo. Por lo tanto:

- Cuando el cuerpo en estudio en el subsuelo es **muy buen conductor**, el ángulo  $\phi$  se aproxima a  $90^\circ$ . El campo secundario está atrasado casi  $180^\circ$  respecto al campo primario
- Si en cambio el emplazamiento tiene **baja conductividad**,  $\phi$  adopta un valor cercano a cero. El atraso es, en este casi muy próximo a  $90^\circ$ .

El campo resultante estará retrasado un ángulo  $\alpha$  respecto al primario, pudiéndose observar que cuando el conductor es muy bueno el ángulo  $\alpha$  tiende a cero.

Utilizando este mismo diagrama vectorial han sido introducidos los conceptos de componentes real e imaginaria, que son de mucha importancia en los métodos de prospección más utilizados. Proceden de los abordajes teóricos que en torno al 1900 hizo el brillante matemático italiano **Tullio**

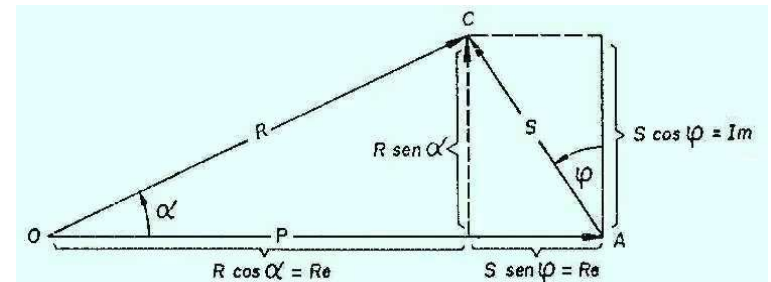


Diagrama vectorial que representa las relaciones entre las componentes real e imaginaria de los campos Secundario y Resultante.

(modificado de Parasnis, 1971)

**Levi-Civita**. La proyección del vector resultante R sobre el eje x es igual a  $R \cdot \cos \alpha$ . De la misma manera, la proyección de S sobre x es  $S \cdot \text{sen } \phi$ . Tanto una como otra componente están en fase con el campo primario y se las denomina componente real o en fase.

De igual modo, la proyección de R y S sobre el eje y nos dará en cada caso una componente atrasada  $90^\circ$  respecto al campo primario, a la que se llama componente imaginaria o en cuadratura. Para el campo resultante esta componente es  $R \cdot \text{sen } \alpha$ , mientras que para el secundario es  $S \cdot \cos \phi$ .

Debe entenderse que **el campo primario, el secundario y el resultante de la interacción de esos dos tienen una cierta posición en el espacio** y que **lo expresado hasta ahora solamente se refiere a cada una de sus respectivas posiciones en el tiempo** (por más que los esquemitas parezcan representar espacio).

La elipse de polarización es el resultado de dos vectores oscilantes sobre un punto, que son el campo primario y secundario. En el tiempo decimos que el campo secundario está retrasado respecto al primario porque este último alcanza su amplitud máxima, una fracción de tiempo antes que el secundario.

En el espacio cualquier vector campo podrá ser descompuesto en sus 3 componentes, y de ellas es la vertical (z) la componente que generalmente es empleada en la prospección EM. Pero además **cualquiera de estas**

**componentes espaciales del campo secundario y del campo resultante podrá ser separada en dos componentes temporales, llamadas una real y la otra imaginaria, o sea respectivamente, una en fase y la otra en cuadratura respecto al campo primario.**

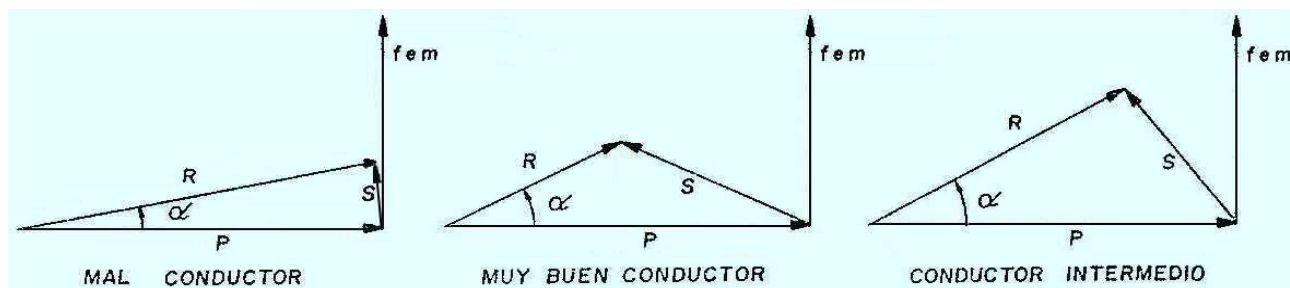
En el diagrama vectorial se puede observar que cuanto mayor es el ángulo  $\phi$ , mayor es la componente real del campo secundario y menor es su componente imaginaria. Pero, como  $\phi$  aumenta cuando aumenta la conductividad del conductor, podemos entonces relacionar el valor del cociente  $Re/Im$  con la conductividad del cuerpo inductor del campo secundario, tendiendo este valor a infinito para un emplazamiento de muy elevada conductividad y a cero para uno altamente resistivo.

De la misma manera podemos analizar la amplitud y el desfase del campo resultante:

- Si el **conductor es muy resistivo**, las corrientes inducidas en él serán débiles y por ende el campo secundario tendrá una amplitud pequeña, y por añadidura el desfase será apenas superior a los  $90^\circ$  de retraso ya dados por la FEM inducida. En consecuencia el campo electromagnético resultante diferirá poco del campo primario, tanto en amplitud como en fase.

- Si se trata de un **muy buen conductor**, el campo secundario tendrá una amplitud grande y su dirección será casi igual a la del campo primario, pero con sentido opuesto. Esto significa que el desfase tenderá a los  $180^\circ$ , o sea que cuando el campo primario alcance un valor máximo, el secundario estará próximo al mínimo y viceversa. Por esto la amplitud del campo resultante disminuye notablemente aunque la diferencia de fase con el primario sea relativamente pequeña.

- Cuando el cuerpo conductor tiene una **conductividad media**, el campo resultante será bastante menor en amplitud que el primario, pero el retraso o desfase será marcado.



Diagramas vectoriales que representan las relaciones entre los campos P, S y R para distintos tipos de conductores.

(modificado de Cátedra Geofísica Universidad Nacional de Cuyo)

La importancia de estos razonamientos está dada por el hecho de que las posiciones relativas en el tiempo de los campos primario, secundario y resultante han servido de base para el desarrollo de los más modernos métodos EM. En algunos de ellos se miden la amplitud y el retraso del campo resultante, mientras que en otros se miden las componentes real e imaginaria del campo secundario.

La mayoría de los métodos opera en la modalidad de **calicatas** (perfiles horizontales). Más adelante veremos **sondeos y otras variantes prospectivas**.

### CALICATAS EM DE EMISOR FIJO (*fixed source EM profiling*)

Existen diversos tipos de calicatas electromagnéticas que varían según el dispositivo empleado y otros detalles funcionales. (Podrían modificarse para registrar sondeos verticales EM análogamente a los SEV de corriente continua, pero no resulta práctico). Todos ellos están diseñados para dar buenas respuestas en terrenos relativamente llanos. **Si el relieve es significativo, debe hacerse una corrección topográfica en base a un modelo**, de forma análoga a lo visto con inyección de corriente.

Estos son los métodos más conocidos, aunque hay varios otros:

- De **Inclinación de Campo**, el método más antiguo, descrito en las páginas previas.
- De **Bieler-Watson** (concebido por **Etienne Bieler** y **Horace Watson** en 1931 en Canadá) el cual en cada punto de medición con la bobina receptora en posición horizontal asume que registra la componente real y en posición vertical capta la imaginaria, cuyos resultados luego se comparan.
- De **Sundberg o del Compensador** (ideado por **Karl Sundberg** en 1931 en Suecia) para mediciones de las componentes real e imaginaria, que utiliza un compensador o puente de corriente alterna para tener tensiones de referencia y así conocer las magnitudes real e imaginaria en cada punto medido a lo largo de la calicata (ejemplo en la página siguiente).

- De **Turam** (Erik Helmer y Lars Hedström, 1937 en Suecia) de dos cuadros (bobinas receptoras) a cierta distancia fija entre sí, con un compensador para medición de la razón de amplitudes y la diferencia de fases, como se detalla más abajo.
- **Detector de Metales** (Gerhard Fisher, 1925 en Estados Unidos) que opera en muy alta frecuencia.
- De **Elipticidad de Alta Frecuencia** (Haven Whiteside, 1962 en Estados Unidos).

**Método de Turam**

(del sueco, dos cuadros)

Es un método de calicateo EM que mide el gradiente del campo alterno.

El dispositivo consiste en:

- Un emisor o fuente, que puede ser un cable largo o bien un bucle (loop) rectangular de cable aislado con lados superiores a 1 km de longitud, en cualquier caso alimentado por una corriente alterna.

- Un receptor que está compuesto por dos bobinas de inducción (exploradoras) llevadas con una separación constante (20 a 40 m) y que van conectadas a un compensador que mide la **diferencia de fases** y la **relación de amplitudes entre los campos resultantes recibidos** por las dos bobinas.

Éstas se calculan, respectivamente, como:

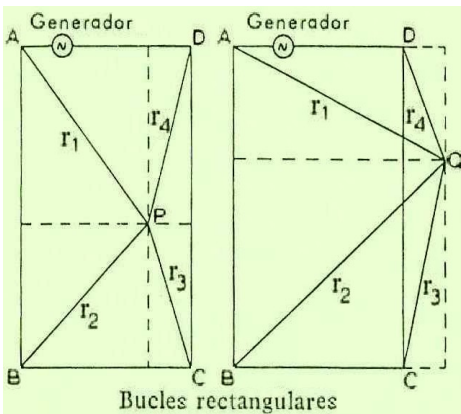
$$\Delta P = \Phi_1 - \Phi_2 \quad \text{y} \quad RR = (B_1 / B_2) / (r_2 / r_1)$$

**El denominador (r2 / r1) es la corrección geométrica resultante del cociente:**

$(\mu_0 \cdot I / 2\pi \cdot r_1) / (\mu_0 \cdot I / 2\pi \cdot r_2)$   
a partir de la ley de Biot y Savart para un cable largo.

En un medio homogéneo:

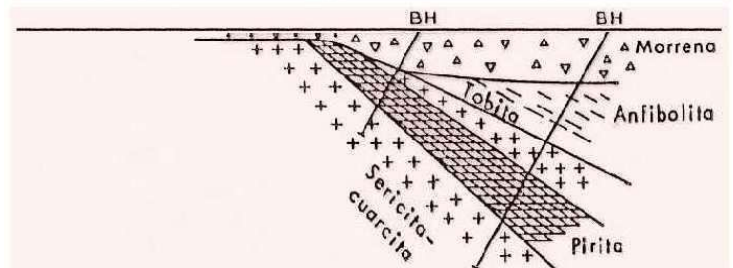
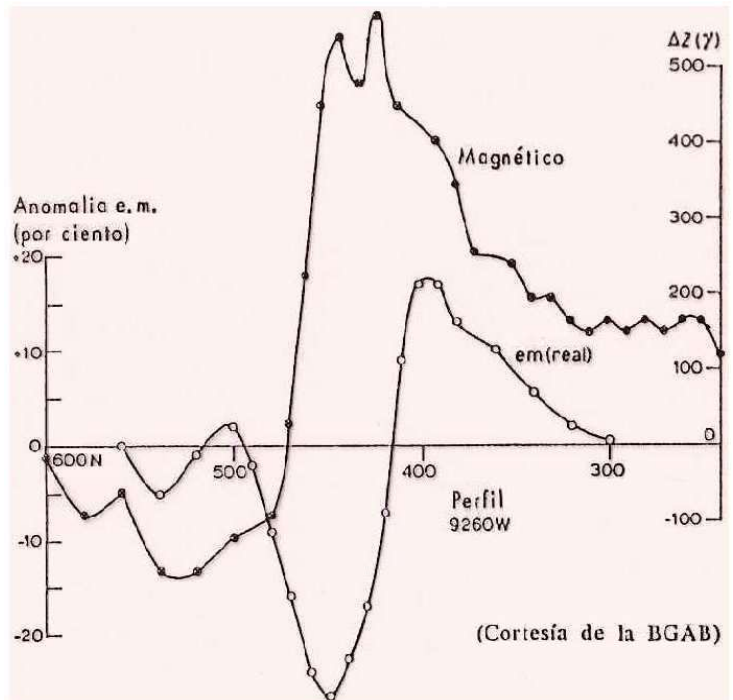
$$RR = 1 \quad \text{y} \quad \Delta P = 0$$



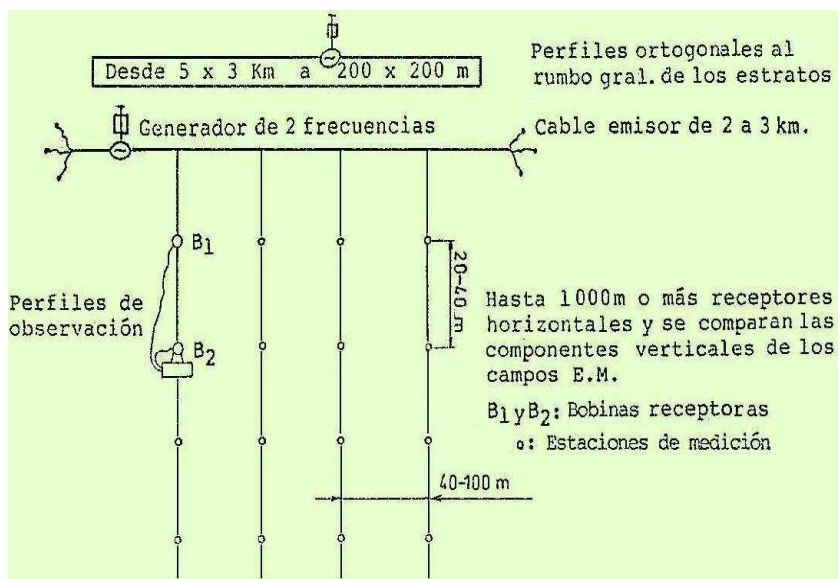
Esquema de mediciones sobre un bucle. (figuras modificadas de Parasnis, 1971)

Los bucles rectangulares en general son formas de emisión prácticas en zonas llanas.

Un **compensador de corriente alterna** es un sistema para medir componentes en fase y en cuadratura de un



Mediciones de compensador. Perfil sobre el yacimiento de Svansle con la componente electromagnética real, anomalía magnética de la componente vertical, interpretación y resultados de las perforaciones. (modificado de Parasnis, 1971)



Calicatas o perfiles paralelos entre sí y perpendiculares al cable emisor.

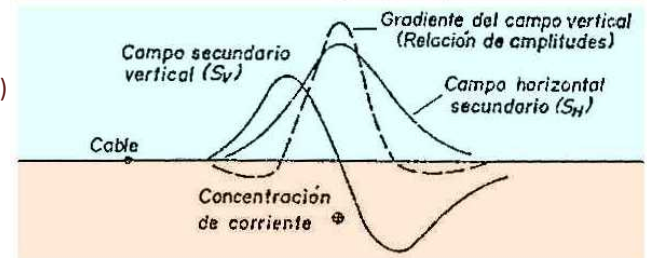
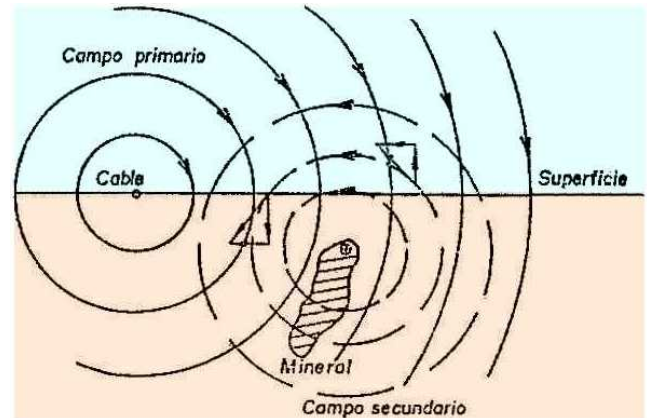
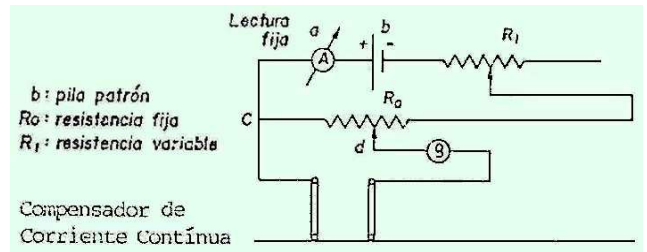
voltaje alterno inducido sobre una bobina receptora. Es parecido al compensador de corriente continua, con la diferencia de que se debe disponer de dos voltajes ajustables y comparables con la tensión inducida, estando ambos voltajes con una diferencia de fase de 90°. Esto se puede conseguir a través de un circuito apropiado con capacitores e inductancias.

**Los compensadores pueden calibrarse para medir la amplitud y fase del campo en el receptor**, tal como es requerido para el método de Turam, o bien, **alternativamente, para cuantificar los valores de las componentes real e imaginaria del campo resultante**. Dichas componentes también pueden medirse sobre el campo secundario, ya que éste puede ser deducido inmediatamente a partir del conocimiento de los campos primario y resultante.

La intensidad del campo primario depende del tamaño y forma del transmisor y de la ubicación del punto de observación.

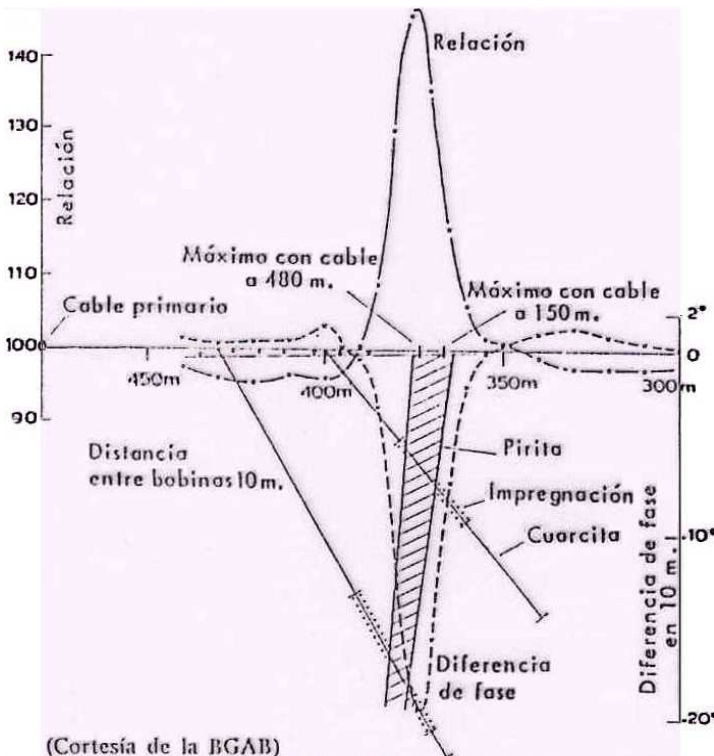
**Al llegar al conductor, la razón de amplitudes alcanza un valor máximo mientras que la diferencia de fases da un máximo negativo.**

(figuras modificadas de Parasnis, 1971)



Campo Electromagnético Primario debido a un cable largo y campo secundario debido a la presencia de un cuerpo conductor en subsuelo.

**El método de Turam es sumamente efectivo en yacimientos superficiales, vetiformes y de alto buzamiento;** ver caso a la izquierda. Las calicatas deben ser ortogonales a los rumbos geológicos. La profundidad de exploración se puede controlar en cierta medida mediante la variación de la distancia entre bobinas, así como cambiando las frecuencias empleadas, como veremos para los sondeos de frecuencia.



Perfil electromagnético de Turam. (Relación y diferencia de fases cada 10m) sobre el yacimiento de Kimheden, perfil 720 E. Frec.350c/s.

### Detector de metales (metal detector)

Es un sistema de bobina receptora única, de fácil transporte (foto arriba, tracción a sangre...), con la que se explora el terreno en el rango de las muy altas frecuencias (VHF, Very High Frequency de 30 a 300 MHz) con el objetivo de detectar mineralizaciones metalíferas, objetos de metal enterrados por acción humana o fracturas del terreno con presencia de agua. (O la hebilla del cinto en el preembarque). La bobina mide la inclinación del campo resultante y de ahí se calculan las componentes real e imaginaria del campo secundario. **Su fuente**



Carrito detector de metales (foto Geonics)

son las ondas de radio (en su rango de frecuencias, en esencia planares y horizontales por su lejana emisión, y su rebote en la ionosfera), lo cual hace de él un método de campo natural, aunque suele recurrirse al refuerzo del campo radial disponible en el área con pequeñas antenas emisoras VHF dispuestas en las cuatro esquinas de la zona a prospectar, o bien un cable tendido en el suelo a lo largo de hasta 1 km, alternativas que mejoran las imágenes obtenidas. Adicionalmente se puede recurrir a un par de electrodos de potencial espontáneo para dar mediciones de resistividad que pueden asociarse a alteraciones en zonas donde hay presencia de oro, plata u otros metales de interés económico. Con el detector de metales también puede registrarse desde dron.

**Elipticidad de alta frecuencia** (high frequency ellipticity)

A partir de las ondas electromagnéticas dadas por una antena emisora de altas frecuencias, del orden de los 500 a los 2.000 kHz, mide las tres componentes de los campos resultantes (polarizados elípticamente) para resolver sus vectores componentes H (magnético) y E (eléctrico), girando una bobina sobre los tres ejes del espacio y haciendo las determinaciones mediante un sistema de compensador electromagnético y detección electrónica. Puede operar con uno o varios receptores.

**CALICATAS EM DE EMISOR Y RECEPTOR MÓVILES**

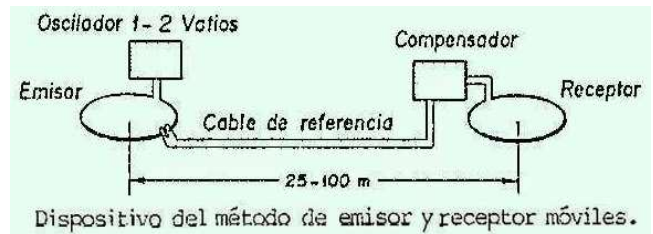
Surgidas durante la Segunda Guerra Mundial, esencialmente para prospección aérea, también se registran en la modalidad terrestre. El dispositivo general consta de una bobina emisora y otra receptora, pudiendo éstas situarse en distintas posiciones:

- Coplanares horizontales -
- 0 Coplanares Verticales 0
- | Coaxiales Verticales |

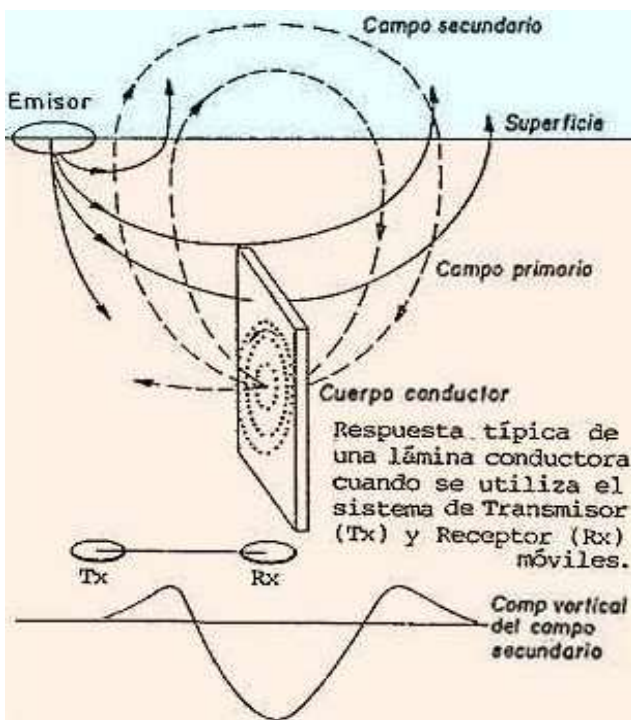
El arreglo coplanar horizontal se usa en prospección terrestre, tal el caso del método de Slingram. Los otros dos, en cambio, son típicos del relevamiento aéreo: las bobinas pueden ir en los extremos de las alas del avión, también en la nariz y en la cola del mismo, con soportes especiales (algo muy usual cuando se recurre a helicópteros), o bien montadas en un soporte que cuelga lejos de la nave, o con una bobina sobre la máquina y la otra remolcada con un cable (de unos 50 ó 100 metros, más abajo y algo más atrás), en cuyo caso hay cierto grado de rotación y la relación planar ya no se mantiene.

**Método de Slingram** (del sueco, remolcar cuadros; en inglés HLEM, Horizontal Loop EM)

Este método, desarrollado por la empresa sueca ABEM, emplea bobinas coplanares horizontales y se caracteriza porque no sólo es móvil el receptor, sino



(modificado de Parasnis, 1971)

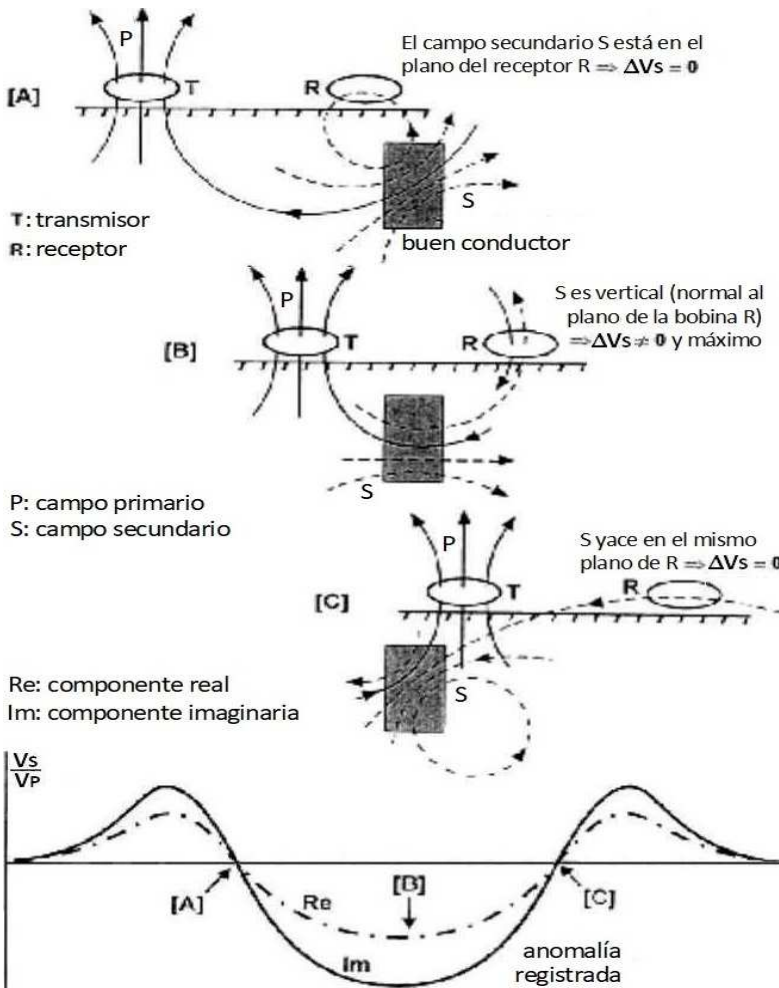


(modificado de Cátedra Geofísica Univ. Nac. de Cuyo)

que lo es también la fuente del campo primario, constituida por una bobina portátil de peso liviano.

La bobina emisora es alimentada por la corriente alterna suministrada por un oscilador portátil de 1 a 2 vatios y de ella se toma una tensión fija de referencia que es introducida en un compensador. La tensión en el receptor se descompone en dos partes, una en fase y la otra desfasada 90° (un cuarto de periodo) respecto a esa tensión de referencia. La magnitud de cada componente se determina por comparación con ella. Este campo primario es muy sensible a pequeñas variaciones de distancia entre Tx y Rx, como también a variaciones de la orientación de las bobinas.

El emisor y el receptor, separados por una distancia fija, son desplazados conjuntamente en la dirección de la línea que determinan, la cual puede ser paralela o perpendicular al rumbo supuesto para el conductor buscado, según la orientación del emisor (Tx) y del receptor (Rx). El trabajo con los sistemas de emisor y receptor móviles es ágil, la prospección no necesita



ligarse rígidamente a una red de líneas estaqueadas y los sistemas permiten gran flexibilidad. Un miniequipo de dos personas basta para hacer las mediciones, llevando uno el oscilador sobre su espalda y el transmisor o emisor (bobina) alrededor de su cintura, mientras el otro fulano o fulana lleva la bobina receptora y el compensador. Los esquemas de la izquierda ilustran las respuestas registradas con su graficación abajo. Una bobina receptora horizontal no detecta anomalía cuando está justo encima de ella porque el campo secundario allí es horizontal. Tampoco si la bobina emisora es vertical y está sobre el cuerpo anómalo porque en ese caso no induce corrientes de Foucault. Los mayores valores negativos de S se registran cuando el conductor está en medio de las dos bobinas.

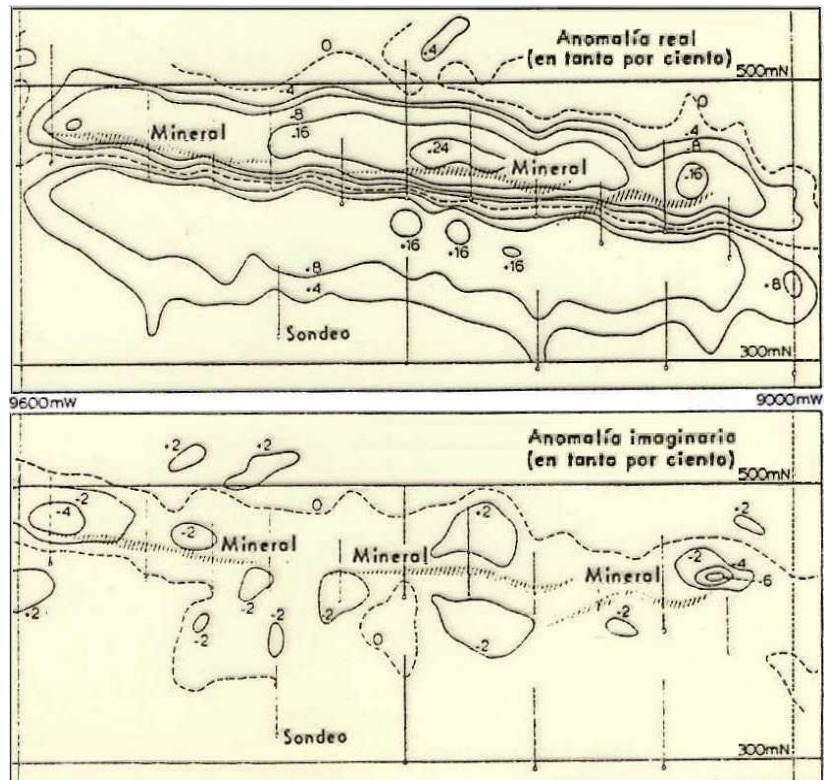
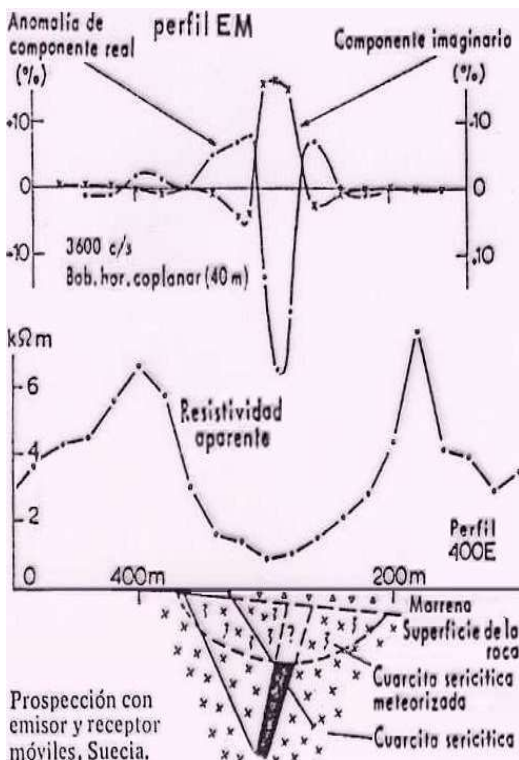
En este, como en otros métodos EM, puede ser necesario proceder a una **corrección por topografía**, si ésta es significativa. Por caso, para bobinas coplanares horizontales la corrección de la componente real vale:

$$CR = 300(h^2 / r^2)$$

(siendo h la diferencia de cota y r la distancia entre las bobinas)

Izquierda, registros en 3 posiciones y perfil Slingram tras n registros (gráfico modif. de Laurent Marescot)

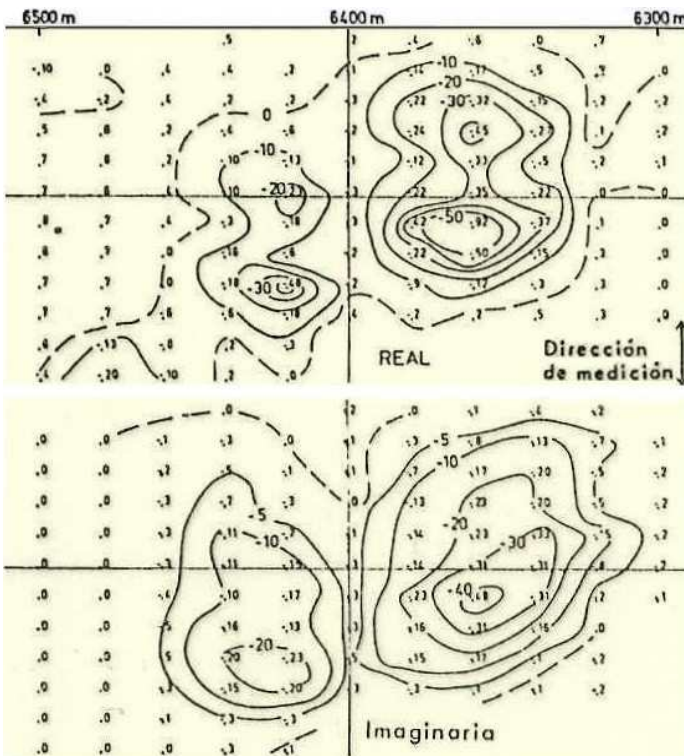
Abajo y derecha, casos de prospección con el calicatero de Slingram (modif. de Parasnis, 1971)



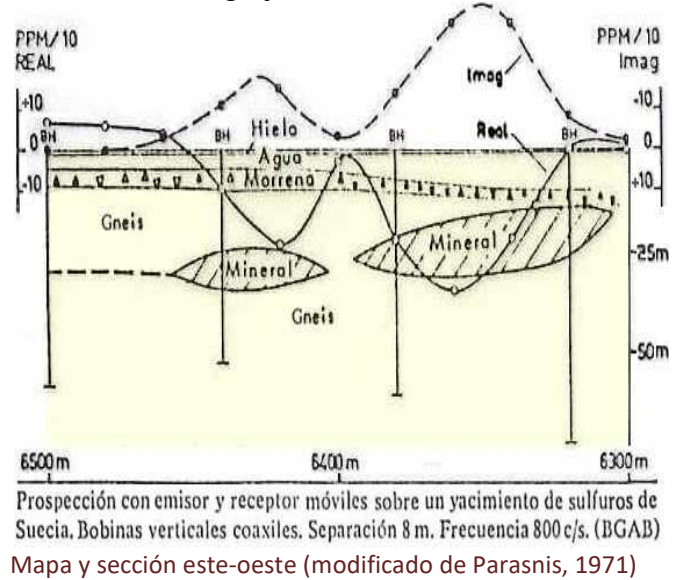
Prospección del yacimiento de pirita de Svanselse (Suecia) con emisor y receptor móviles. Bobinas coplanares horizontales, separación 60 m. Frecuencia 3600 Hz. (cortesía BGAB)

Por motivos prácticos suele recurrirse a separaciones entre bobinas relativamente pequeñas (25 a 100 m) y generalmente no están vinculadas rígidamente entre sí; la distancia entre ellas se mantiene constante usando como cinta el cable de referencia. *Se leen las componentes real e imaginaria del campo secundario en el receptor como porcentaje del campo primario*; este último es el campo existente en el receptor cuando el sistema se coloca en terreno sin anomalías o neutro. Entonces, una vez seleccionada la distancia entre Tx y Rx, el sistema se coloca en terreno neutro y las agujas se colocan en cero, y cuando no haya señal en el receptor significa que el campo primario ha sido compensado. Tras haber hecho esto, los valores que se obtienen dan directamente el valor de las componentes del campo EM.

En la posterior interpretación de los datos debe tenerse presente que las *anomalías dispersas debidas a la conductividad de las formaciones próximas a la superficie pueden interferir con las anomalías de origen más profundo, interferencia que será mayor cuanto más alta sea la frecuencia de trabajo empleada.*



*La asimetría de las curvas, ya sea en perfil o planta, en general es indicativa del buzamiento de los emplazamientos anómalos en el subsuelo, al igual que en otras variantes EM y en todos los demás métodos geofísicos.*



Prospección con emisor y receptor móviles sobre un yacimiento de sulfuros de Suecia. Bobinas verticales coaxiales. Separación 8 m. Frecuencia 800 c/s. (BGAB) Mapa y sección este-oeste (modificado de Parasnis, 1971)

### Conductímetro (conductivity meter)

Basado en el “beam slingram” de la compañía sueca Boliden, es un sistema tipo vara (foto a la derecha) de bobinas móviles portátiles, coplanares horizontales o verticales de separación fija, que permite registrar el campo electromagnético y obtener datos de resistividad eléctrica  $\rho$  –o su inversa, la conductividad  $\sigma$ – y opcionalmente de susceptibilidad magnética a profundidades variables según la configuración del sistema, desde 1 hasta 60 m. Puede llevarse suspendido desde aeronaves y la vara es de un material aislante, usualmente fibra de vidrio.

En éste, como en algunos otros métodos EM, es posible entonces obtener valores de  $\sigma$  (o  $\rho$ ) que surgen de la siguiente expresión analítica:  $H_s/H_p = V \cdot \sigma^2 \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot l / 4$

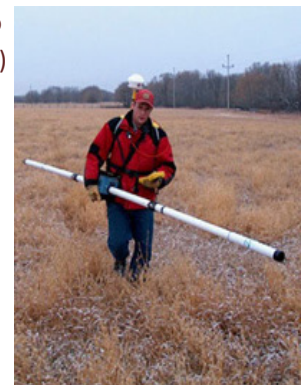
$$\text{de donde: } \sigma = [(4/V \cdot \omega \cdot \mu_0 \cdot l) \cdot (H_s/H_p)]^{1/2}$$

(siendo  $H_s$  el campo magnético secundario,  $H_p$  el primario,  $\mu_0$  la permeabilidad magnética en el vacío,  $V$  el potencial eléctrico,  $l$  la distancia, y la frecuencia angular  $\omega = 2\pi \cdot f$ )

### Ejemplos aereolectromagnéticos

Al igual que en magnetometría, también *los métodos EM se emplean principalmente desde el aire*. Se trata de distintas variantes de los métodos de emisor y receptor móviles: sea con bobinas coaxiales o coplanares verticales, en la nave o remolcadas, o desde drones (ver Parshin *et al.*, 2021). Si sólo una de las bobinas va colgando, gira respecto a la que va en la máquina y en este caso solamente puede medirse la diferencia en la

Conductímetro (foto Geonics)



fase (temporal, que no es dependiente de la orientación) y no se registra el módulo del campo R ni del S (y por tanto tampoco de las componentes real/imag).

Dron llevando vara de bobinas (foto sagtechgeophysics.com)



Slingram heliotransportado (foto US Geological Survey)

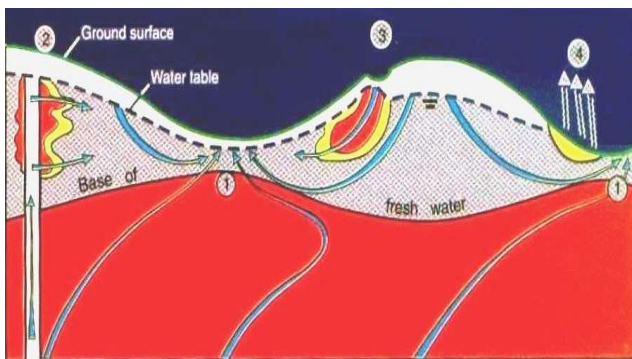
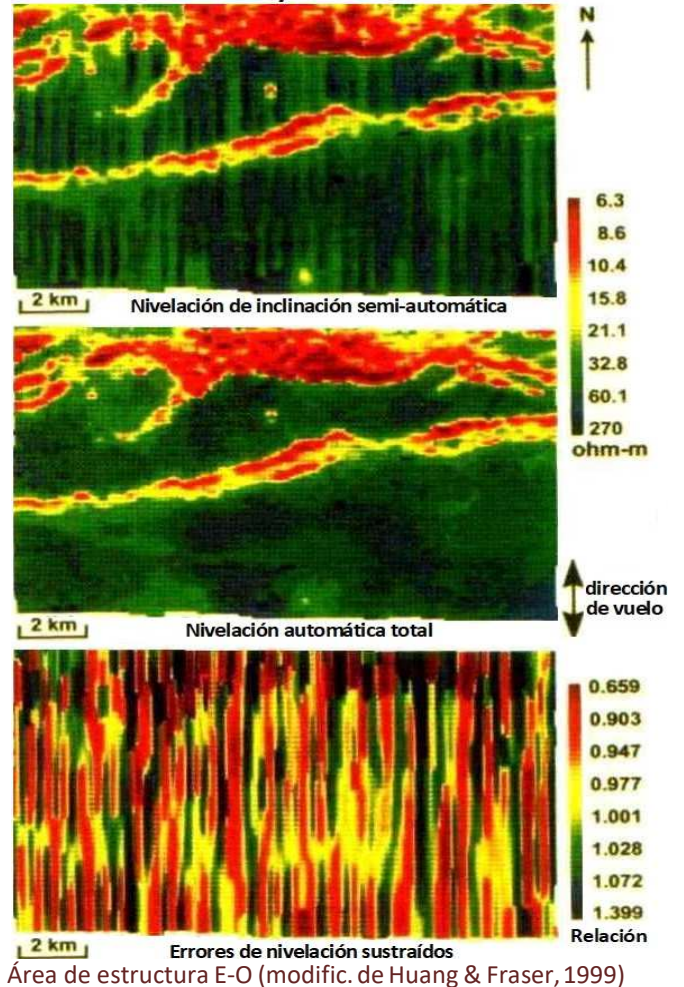


En las figuras más a la derecha, para geología regional, **adquisición desde helicóptero** y **correcciones aplicadas a los datos procesados** (ya con los valores calculados de  $\rho$ ) para así homogeneizar las diferencias de amplitud de la señal debidas a los desniveles de las líneas de vuelo (evidentes en la tercera figura).

Abajo, un caso de adquisición desde avión sobre una **explotación de hidrocarburos** en

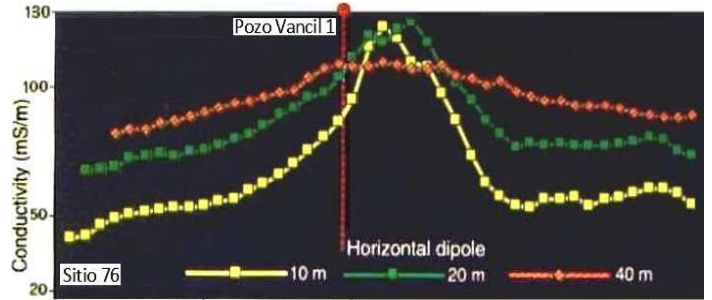
Texas. La figura debajo es el modelo de las fuentes de contaminación del acuífero somero dulce (*fresh*) por la presencia de salinas naturales en la superficie y por el ascenso de aguas de formación saladas en pozos con mal aislamiento. A la derecha se ven las curvas obtenidas con las calicatas EM que atraviesan la locación de un pozo petrolero antiguo, registradas con distintas distancias entre bobinas (en amarillo la lectura más somera, en verde la intermedia, en rojo la más profunda) y abajo su interpretación.

Nivelación de datos de  $\rho$  aérea:

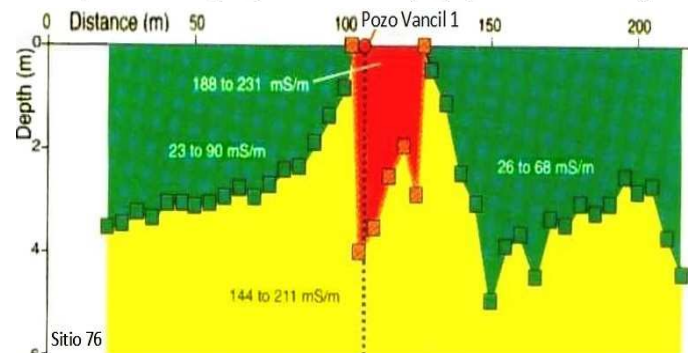


Modelo de fuentes de salinidad en el área.

EM en Texas, ver texto (figuras modif. de Paine et al., 1997)



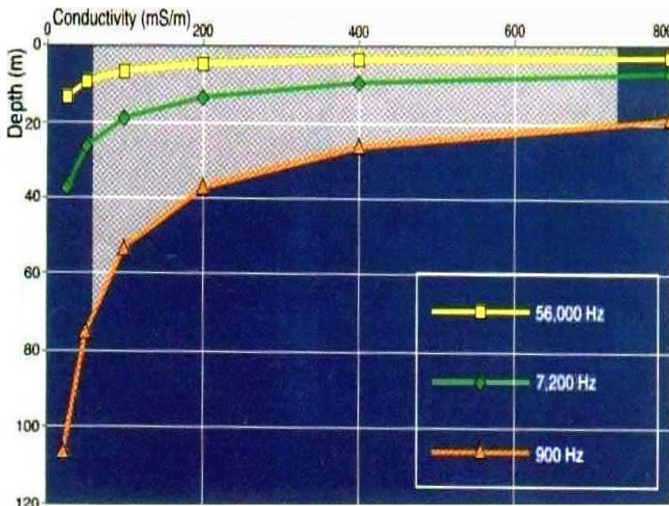
Perfiles de conductividades aparentes registrados con un arreglo EM terrestre de 10, 20 y 40 metros de separación entre bobinas. Véase cómo se entrecruzan las tres curvas en el sector del pozo. Cuanto mayor separación de bobinas, mayor profundidad de investigación.



Modelo de conductividades que mejor ajusta. El sector de alta  $\sigma$  corresponde a la infiltración de agua salada desde la profundidad por mala cementación del encamisado del pozo.

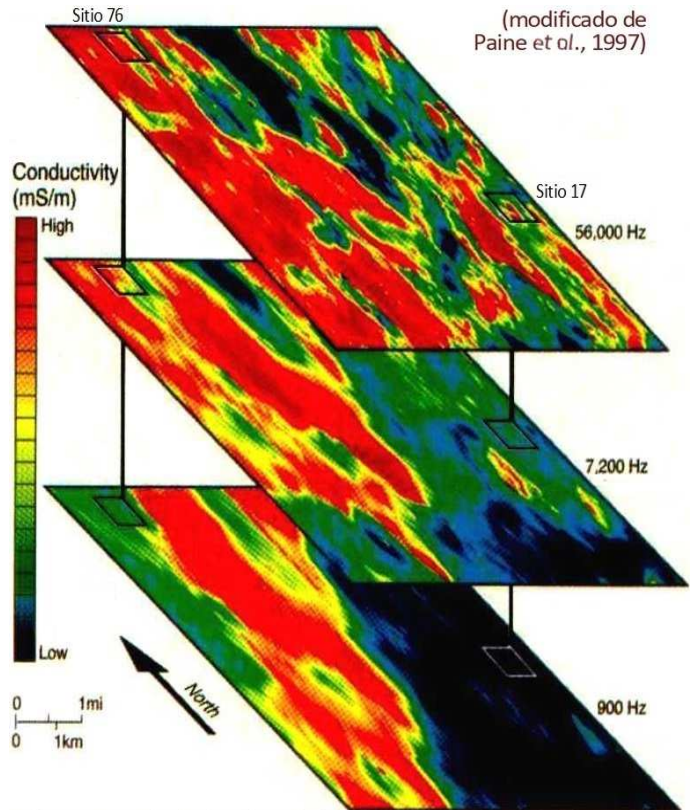


Avión en prospección EM; las bobinas pueden ser instaladas en la nariz, la cola o los extremos de las alas (foto Éireann Suirbhéireacht Gheolaíochta)



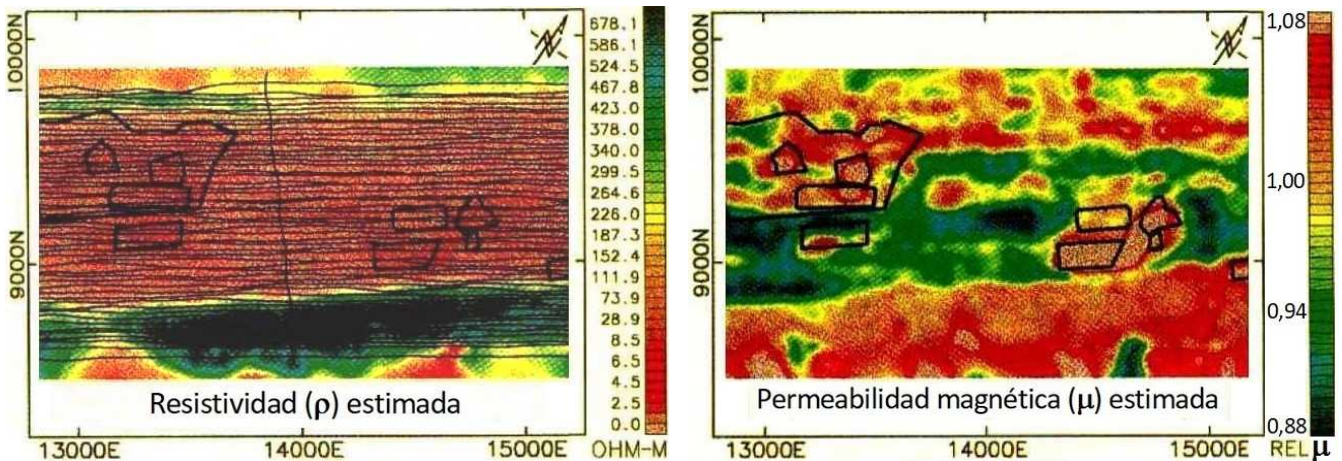
Cambio en la profundidad de exploración estimada según la conductividad del subsuelo para las tres distintas frecuencias. En gris el rango de valores dentro del área en estudio.

consigue varía con el cambio de frecuencia emitida y también en función de la conductividad del medio (figura izquierda, *a mayor  $\sigma$  y mayor  $f$ , menor  $z$* ), lo cual constituye una *aplicación combinada de calicata con sondeo de frecuencias* (que se explica más adelante). Es la técnica de *Frequency Domain EM, FDEM*.



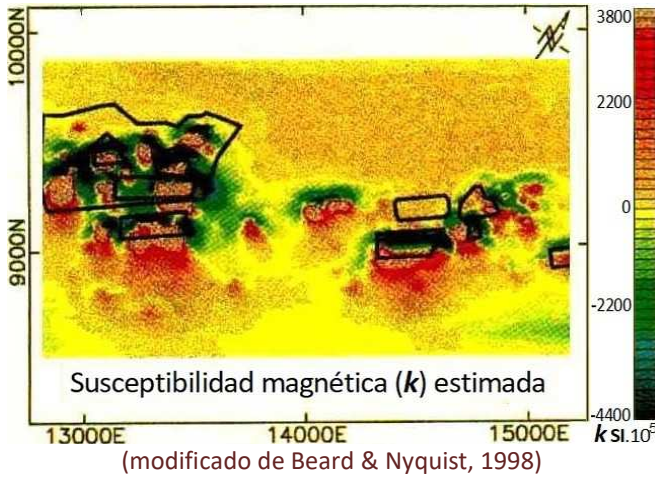
Imágenes registradas desde avión con bobinas horizontales coplanares y frecuencias de 56000, 7200 y 900 Hz, correspondientes en ese orden a crecientes profundidades de iluminación. Las mayores conductividades indican zonas de presencia de agua salada.

La figura acá arriba, en el mismo yacimiento texano, exhibe data de EM aéreo para evaluar el impacto ambiental del ascenso de las aguas formacionales hacia la napa freática dulce. *Interpolando entre calicatas se generan mapas*. La penetración que se



Los trazos horizontales y el vertical son las trayectorias de vuelo de adquisición EM; los contornos cerrados indican los sectores de basurales cubiertos en Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. (figuras modificadas de Beard & Nyquist, 1998)

Los dos mapas precedentes corresponden a un relevamiento hecho sobre *basurales* donde se presentan los resultados en tres fórmulas de cálculo diferentes a partir de la misma información registrada, lo cual revela la



importancia de emplear diferentes algoritmos para hallar los parámetros de representación que mejor evidencien las anomalías a evaluar (y en este caso remediar). Obsérvese que de los tres mapas, es el de susceptibilidad magnética (acá a la izquierda) el que mejor evidencia los sectores de descarga de residuos con componentes magnéticamente distintivos. A veces incluso sin cambiar la fórmula de cálculo, sino solamente modificando las escalas cromáticas de los mapas o perfiles, se consigue hacer resaltar las anomalías geofísicas de cualquier tipo que sean (eléctricas, gravimétricas, geotérmicas y demás).

**SONDEOS DE FRECUENCIAS**  
(frequency soundings)

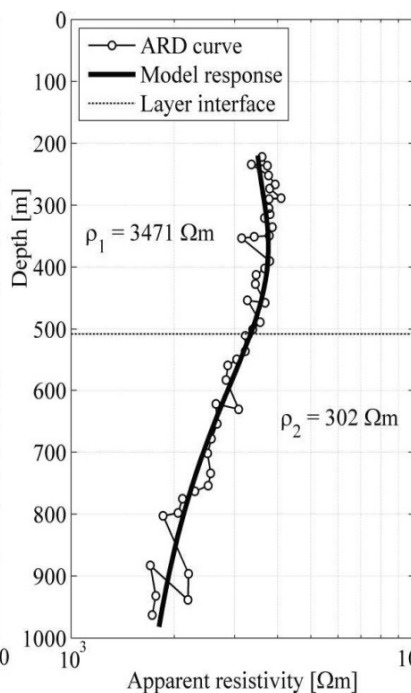
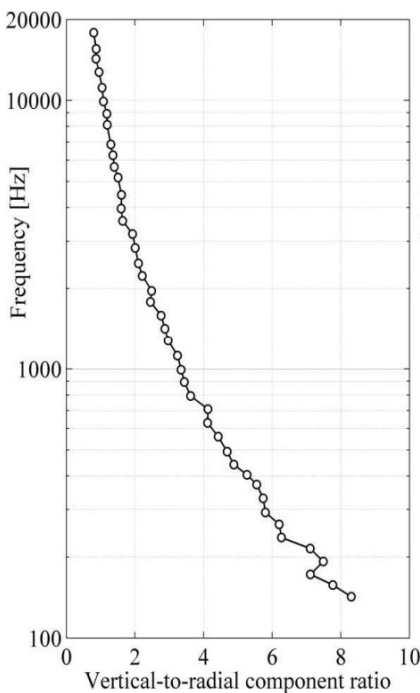
Consisten en la **emisión y recepción en posiciones fijas, variando la frecuencia de la fuente** –sin recurrir a la alternativa de ir aumentando la separación de las bobinas–, de modo de **iluminar en forma predominante zonas sucesivamente más profundas a medida que se utilizan más bajas frecuencias**. Debe recordarse que las altas frecuencias generan respuestas muy intensas incluso de rocas poco conductoras, por lo cual el encape, aun siendo relativamente resistivo, puede dar una alta respuesta cuando se opera con muy altas frecuencias. *Ergo, cuanto más se baje la frecuencia, más se logrará evitar respuestas poco profundas de conductores hasta de mediana conductividad y consecuentemente mejor se verán los niveles profundos* que sean muy conductivos.

La profundidad de penetración **Z** depende inversamente de  $\sigma, \mu$  y  $\omega$ :  $Z = \sqrt{\frac{2}{\sigma \cdot \mu \cdot \omega}}$

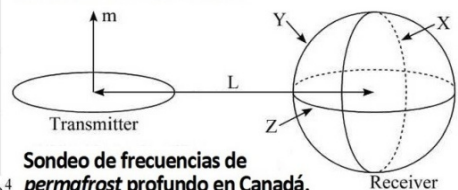
(con  $\omega = 2\pi \cdot f$ ) de donde **Z** puede estimarse con la siguiente expresión empírica:  $Z(m) = 503 \sqrt{\frac{\rho(\Omega m)}{f(Hz)}}$

Para, por ejemplo, 10  $\Omega m$  de resistividad del medio, con 10 Hz se obtiene una profundidad de investigación de unos 500 m, con 100 Hz se alcanzan 150 m y con 1.000 Hz los 50 m.

Además de las imágenes de Paine *et al.*, 1997 (pág.184, que combinan sondeo con calicateo aéreo y terrestre), a continuación vemos las figuras de un caso canadiense que ejemplifica esta modalidad electromagnética.



Asumiendo una geología local de capas horizontales, los cocientes entre las componentes vertical y radial  $Ri = Zi/Xi$  para cada frecuencia  $f_i$  son los que proveen información acerca de la estructura conductiva vertical del subsuelo desde distintas profundidades hasta el punto medio entre emisor y receptor. Para la interpretación cualitativa, los cocientes  $Ri$  son transformados en curvas de  $\rho$  aparente en función de la profundidad (curvas ARD) empleando el algoritmo de cálculo de Aittoniemi y colaboradores (1987). La interpretación cuantitativa de los sondeos se realiza por medio de un programa computacional (Sipola, 2002) que, mediante una optimización no lineal, hace encajar la respuesta de un modelo de terreno en capas 1D con los cocientes  $Ri$  observados.

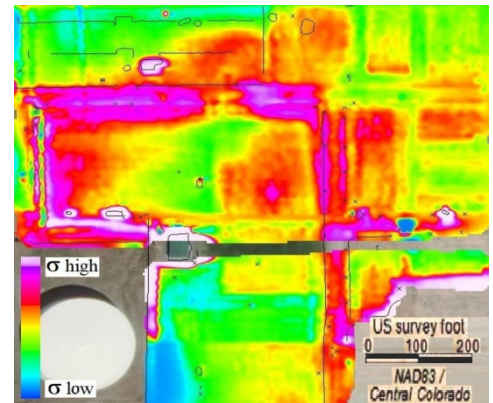


Sondeo de frecuencias de permafrost profundo en Canadá.  
(modificado de Korhonen *et al.*, 2009)

Hemos ya graficado un sondeo EM ultraprofundo (hasta 60 km, Tema 06, pág.139) en el escudo Fenoscandio oriental (Rusia) con las modalidades *MT-AMT* y *CSAMT* (*Controlled Source Audio Magneto-Tellurics*), la primera de campo natural y la segunda recurriendo a uno artificial muy potente para mejorar los registros pero siempre con el procedimiento usual en campos naturales.

**TOMOGRAFÍAS EM en el Dominio de la Frecuencia** (*Frequency-Domain EM* o *FDEM*)

Al igual que en los sondeos de frecuencia, también esta técnica registra distintas frecuencias, tal como acontece con las calicatas aéreas interpoladas como mapas en el caso descrito de Texas. La adquisición se obtiene con un conductivímetro (Slingram de vara) terrestre o aéreo. Pueden registrarse las componentes del campo electromagnético en fase (real) y en cuadratura (imaginaria) por separado. En fase es mayor la sensibilidad a la componente magnética, y por ende más sensible a cambios en la susceptibilidad magnética, principalmente por presencia de metales. En cuadratura la sensibilidad es mayor para la componente eléctrica, y en consecuencia lo es más respecto a la litología y en especial el contenido de agua. El mapa ilustrado a la derecha, en cuadratura (componente imaginaria), exhibe justamente mayores contenidos de humedad en colores cálidos en sectores de lenta filtración ácuea.



Mapa en FDEM comp. imag, en Colorado, U.S.A. (modific. de Olson Engineering Assoc.)

**TOMOGRAFÍAS EM en el Dominio del Tiempo** (*Time-Domain EM* o *TDEM*)

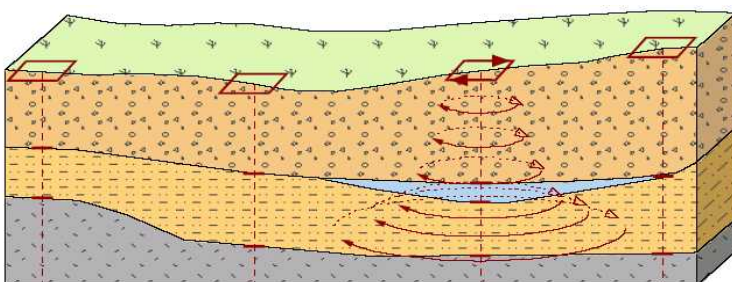
También se lo llama método **EM Transitorio** (*Transient EM*) o **Eltran** y el concepto surgió del canadiense **Arthur Brant** y colaboradores en 1966, luego completado por los estadounidenses **David Halliday** y **Robert Resnick** en 1974. Consiste en calicatas desde decenas hasta 3.000 o más metros de longitud con un procedimiento que a la vez permite sondear a gran profundidad. Puede hacerse con emisor fijo o móvil. **En éste, como en los demás métodos EM debe ponerse atención a los posibles ruidos de cualquier índole: tuberías, líneas de alta tensión y todo aquello que puede ser detectado sin ser la señal buscada; en la adquisición para intentar evitarlos o minimizarlos, en el procesamiento para tratar de disminuirlos o eliminarlos y, de persistir, también en la interpretación para descartarlos evitando malos diagnósticos.**

**Con emisión móvil**

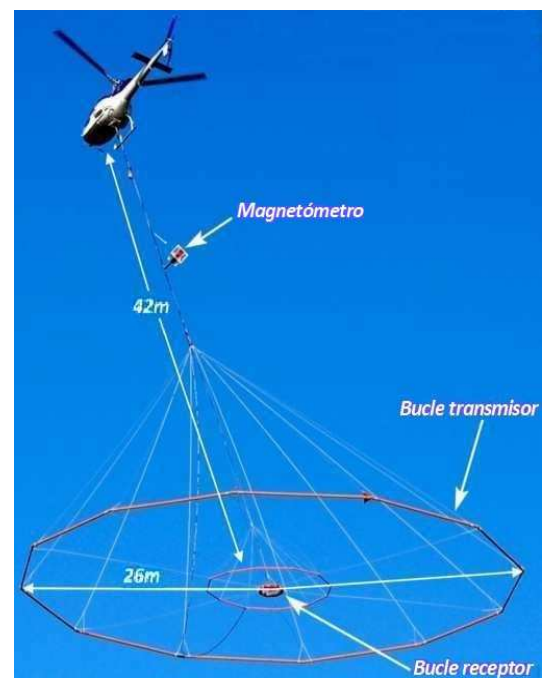
Se emplean **uno o más transmisores** y **uno o más receptores** (por ejemplo, dos bobinas coplanares y dos coaxiales), **generalmente en modalidad aérea**, avión o helicóptero (ver foto, con bucles), aunque también se están utilizando drones. Se opera transmitiendo un campo EM primario y luego registrando su respuesta transitoria (*transient*) en los planos *x, y, z* en **ventanas temporales** (30 o más) entre alrededor de 1 y 2.000 o más  $\mu$ s, información que proviene de distintas profundidades, según la demora en su registro. Usualmente se obtienen **registros buenos desde decenas hasta cientos de metros de profundidad.**

**Con emisión fija**

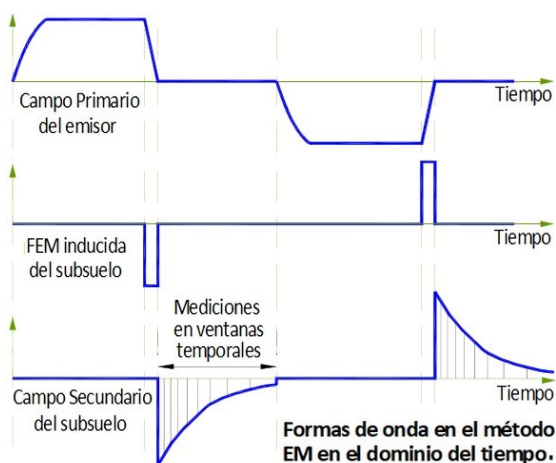
Desde un **bucle cuadrado en el terreno** (cable de decenas hasta cientos de metros de lado; figura abajo) se aplican **pulsos de corriente alterna de algunos  $\mu$ s** que generan un campo magnético primario variante en el tiempo que se introduce en el subsuelo con la forma del bucle. Éste crea una FEM y un campo secundario por cada conductor del subsuelo, que va decayendo y generando nuevas corrientes de remolino que se expanden como anillos de humo. **Las mediciones de estos campos EM transitorios se hacen en el centro del bucle en los intervalos de no emisión.**



Emisión desde bucles fijos (gráfico de Northwest Geophysical)



VTEM helitransportado (foto Geotech)



(modificado de McNeill, 1990)



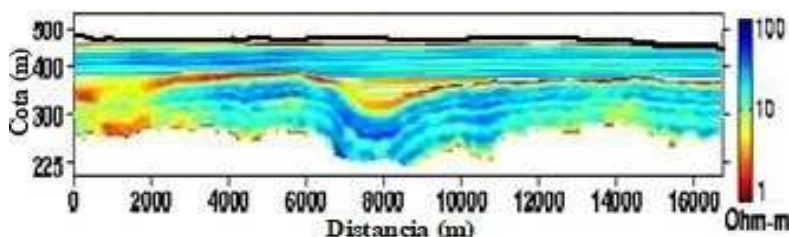
Receptor TDEM portátil (foto Olson Engineering Assoc.)



Equipo para adquisición EM en el dominio del tiempo (foto cqtopgeo.com; China)

El equipo generador va conectado al bucle emisor tendido en el terreno. El bucle receptor se ubica en el centro del anterior, tiene de 1 a pocos metros de diámetro y puede ser transportado fácilmente (fotos arriba).

La profundidad de investigación depende del tiempo transcurrido entre el corte y la medición. La intensidad de las respuestas procedentes de campos secundarios generados es proporcional a las corrientes de remolino de donde proceden y por tanto de la conductividad de las profundidades de las cuales provienen. Además del tiempo, también el tamaño del bucle, la frecuencia de la señal y la resistividad del suelo determinan la **profundidad de investigación máxima, que en condiciones favorables puede superar los 2.000 m.**



Sección EM regional en el noroeste de Estados Unidos (modificada de Northwest Geophysical)

**Procesamiento de los datos**

*Se aplican correcciones metodológicas y luego los datos se invierten* a través de un proceso en computadora –por ejemplo, mediante una migración por continuación descendente, como en gravimetría, magnetometría o sísmica– que permite la generación de modelos de cuerpos conductivos, fallas, etc. **Se puede calcular la conductividad (o su inversa, la resistividad),**

**además de la susceptibilidad y la permeabilidad magnéticas,** partiendo de la asignación de valores conocidos o estimados en uno o varios sectores de la calicata obtenida y calculando estas magnitudes en el resto de los puntos registrados en función de la variación de los parámetros electromagnéticos adquiridos.

Estas tomografías pueden conformar cortes o secciones de kilómetros de longitud (figura inmediata superior) y de una profundidad desde cientos hasta un par de miles de metros, según el tipo de emisor. Además se pueden interpolar los datos en planta generando **imágenes areales para distintas profundidades** de interés con las magnitudes antes citadas **e incluso procesamiento de datos en 3D.**

**Aplicación en pozos**

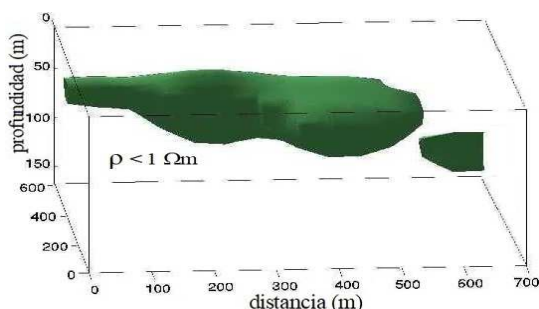
La variante de emisor fijo se puede aplicar en pozos, con el bucle en la superficie en torno a la locación (de unos 500 m de lado) y la bobina receptora haciendo estaciones de registro en puntos preestablecidos desde la parte profunda del pozo hacia arriba, cada estación con un intervalo de registro del campo EM resultante. Sólo se registra esta modalidad en trabajos muy específicos, principalmente mineros.

**REGISTROS HERTZIANOS**

También conocidos como **radiografías hertzianas** o Радиокип (*Radiokip*) en Rusia (A. Tharkov, 1962), han sido **empleados en galerías o perforaciones mineras,** en etapa de cateo o de explotación, **para detectar metalizaciones** entre ellas. El registro EM se basa en la emisión de un campo P de ondas de radio de fuente lejana, ya sea disponibles por las emisiones radiales preexistentes –en cuyo caso puede considerarse un método de campo natural– o bien emisiones artificiales generadas especialmente para este fin.

Lo que se mide, con un microvoltímetro, es el campo eléctrico secundario S generado a partir de dichos campos radiales, el efecto **jaula de (Michael) Faraday,** como la interferencia de radio que oímos al cruzar bajo un puente con hierro. La intensidad de S –y por ende su diferencia de tensión medible– es proporcional a

la presencia de cuerpos conductores emplazados en las rocas entre las galerías mineras, como también depende del rumbo de tales mineralizaciones, debido a que se produce una respuesta más intensa si su orientación es aproximadamente concordante con la dirección del campo electromagnético P generado por las ondas de radio.



Mapeo Radiokip (modific. de Tharkov, 1962)

### UTILIDAD DE LOS MÉTODOS EM

Se orientan sobre todo a la *prospección de minerales conductivos o sus paragenéticos*, tal cual se explicó. Pero los registros EM superficiales tienen otras diversas aplicaciones, como hemos ido refiriendo, principalmente en la *búsqueda de acuíferos* (con  $\rho$  mayores a  $10 \Omega\text{m}$  suelen indicar acuíferos dulces, y aguas de formación saladas si las  $\rho$  son menores), así como *zonas de fractura, descargas contaminantes, yacimientos arqueológicos,*

*identificación de cavernas o conductos artificiales, fundaciones, vapor geotérmico*, y en general todo aquello que genere un cambio en los registros electromagnéticos, principalmente a profundidades menores a los 100 metros (aunque en algunas variantes a más de 1.000 metros con menor detalle). A veces se usan para hallar *tierras raras*, que son 17 elementos químicos: Y, Sc y los 15 lantánidos que se presentan sobre todo en carbonatitas, ígneas alcalinas, arcillas lateríticas y depósitos de placer. A ellos se suman Li, Ti, Co, Mn, Ni, Cr, In, etc. para los circuitos electrónicos, microprocesadores, baterías y armamento de última generación.

En la *búsqueda de hidrocarburos* los métodos EM pueden dar respuestas diferentes en casos de reservorios con agua de formación (salada) frente a otras posiciones con hidrocarburos (más resistivos), pero no constituyen una herramienta de rutina por su baja resolución a grandes profundidades, salvo algunos casos favorables donde la metodología EM en el dominio del tiempo da buenos resultados. Es por esto que sólo se la utiliza esporádicamente como complemento, algunas veces importante, de otras metodologías.

**Su principal ventaja respecto a los métodos de inyección de corriente (continua) es que, al no necesitar contacto con el terreno, pueden operar en prospección aérea** con la ventaja que representa poder hacer una rápida cobertura de grandes áreas exploratorias.

Se sabe que los perfiles de inducción, que operan según los mismos principios que en cateo superficial, son herramientas muy aplicadas en la evaluación de pozos de exploración y desarrollo petrolero, como se verá.

### RADAR DE SUBSTRATO O GEORRADAR (Ground Penetrating Radar, GPR)

Se diferencia de los métodos EM ya descriptos en que sus registros se fundamentan en las variaciones de la **permitividad o constante dieléctrica  $\epsilon$** , en tanto que todos los anteriores se basan en los cambios de  $\rho$ .

El *radar* (acrónimo de *RA*dio *DE*tectio*N* *AN*d *R*angin*g*) fue empleado por primera vez por el británico **Edward Appleton** en 1924 para determinar la altura de la ionosfera. Y durante la Segunda Guerra Mundial los ingleses lo usaron para detectar el arribo de bombarderos alemanes y así poder interceptarlos.

Se basa en la emisión de ondas EM en el rango de las microondas (*VHF* y *UHF*, *Ultra High Frequency* de 30 a 3.000 MHz) y la sucesiva detección de sus reflexiones. Han sido utilizadas para navegación marina (detección de costas, otros barcos, etc.) y también para navegación aérea: radar Doppler (en aviones y torres de control), basado en el efecto de acortamiento o alargamiento de las ondas según el movimiento relativo del observador, análogo al sonido agudo de un motor acercándose y grave alejándose, fenómeno estudiado por el austríaco **Christian Doppler** en 1845, aplicado en 1927 por el cura belga **Georges Lemaître** para descubrir la expansión del Universo: la luz corrida hacia el rojo, tanto más cuanto más lejos está un grupo de galaxias en su fuga.

Los radares también se utilizan desde satélites para mediciones altimétricas aplicadas a diversos campos, entre ellos el estudio del geode y las anomalías gravimétricas del mismo. Y también para obtener *imágenes de la superficie terrestre*, generalmente desde aviones, las cuales tienen aplicaciones geocientíficas y muchas otras. Un caso aplicado a la sismología puede verse en el Tema 11 (pág.301) mediante interferometría.

Son las mismas microondas que nos permiten calentar la comida. Las moléculas dipolares del agua y las de otras sustancias alimenticias rotan para alinearse con el campo electromagnético aplicado, vibran y producen calentamiento dieléctrico. Fue justamente durante el curso de un proyecto de investigación sobre radar con un magnetrón, en 1946 en Estados Unidos, cuando **Percy Spencer** descubrió esta aplicación cotidiana. Ocurrió que un chocolatito que tenía en su bolsillo se le había derretido. A la mañana siguiente decidió colocar el magnetrón cerca de un huevo de gallina, con un colega curioso como testigo. El huevo empezó a vibrar debido al incremento de su presión interna por el rápido aumento de la temperatura y el curioso terminó con la cara salpicada con yema caliente...

Las primeras aplicaciones del radar de substrato fueron realizadas en 1929 por **Walter Stern** en Austria para medir espesores de glaciares, y sólo fueron reiniciadas después de que, a fines de la década de 1950, aviones de la fuerza aérea estadounidense infortunadamente se estrellaran contra el hielo de Groenlandia al leer sus radares de vuelo la base de los glaciares como si fuera su superficie.

La expresión matemática básica de esta interacción física es:  $\epsilon = (C \cdot T_0 / 2Z)^2$  (C es la velocidad de la luz,  $T_0$  el tiempo vertical de ida y vuelta de las ondas, Z la profundidad)

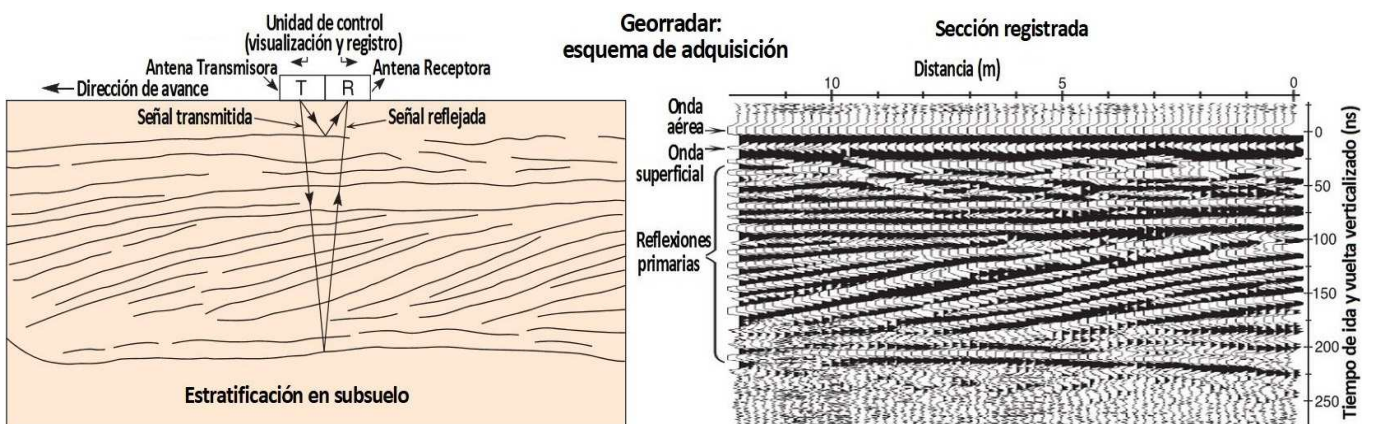
Tabla de parámetros en distintos medios (modific. de Neal, 2004)



Georradar (foto aidatainc.com)

medio	permitividad dieléctrica relativa ( $\epsilon_r$ )	velocidad onda electro-magnética ( $m \cdot ns^{-1}$ )	conductividad ( $mS \cdot m^{-1}$ )	atenuación ( $dB \cdot m^{-1}$ )
aire	1	0.3	0	0
agua dulce	80	0.03	0.5	0.1
agua de mar	80	0.01	30,000	1000
arena insaturada	2.55–7.5	0.1–0.2	0.01	0.01–0.14
arena saturada	20–31.6	0.05–0.08	0.1–1	0.03–0.5
arena y grava insaturada	3.5–6.5	0.09–0.13	0.007–0.06	0.01–0.1
arena y grava saturada	15.5–17.5	0.06	0.7–9	0.03–0.5
limo insaturado	2.5–5	0.09–0.12	1–100	1–300 <sup>a</sup>
limo saturado	22–30	0.05–0.07	100	1–300 <sup>a</sup>
arcilla insaturada	2.5–5	0.09–0.12	2–20	0.28–300 <sup>a</sup>
arcilla saturada	15–40	0.05–0.07	20–1000	0.28–300 <sup>a</sup>
till insaturado	7.4–21.1	0.1–0.12	2.5–10	sin datos
till saturado	24–34	0.1–0.12	2–5	sin datos
turba de agua dulce	57–80	0.03–0.06	<40	0.3
roca inalterada	4–6	0.12–0.13	$10^{-5}$ –40	$7 \times 10^{-6}$ –24

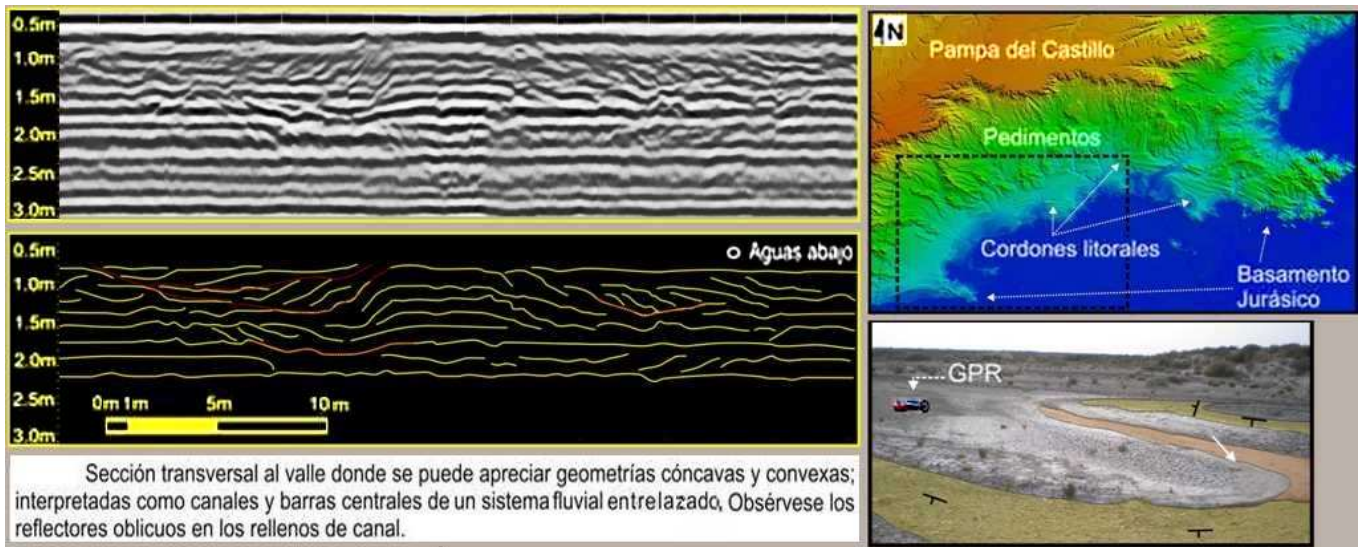
En la prospección geofísica el georradar ha sido empleado crecientemente desde hace tres décadas. **Tiene poca penetración dada la ultraalta frecuencia que emplea.** Generalmente es aplicado a objetivos de muy poca profundidad (**pocos metros**) donde logra una **altísima resolución (de pocos cm)**, aunque puede también a veces iluminar zonas a algunas decenas de metros con menor definición (en suelos arenosos secos, calizas, rocas ígneas o metamórficas). Las imágenes se obtienen con una antena emisora y otra receptora, o bien única emisora-receptora montada en un carrito con rueditas tipo cortadora de césped, la información se graba en computadorita y se le efectúa un **proceso de datos muy similar al que se aplica sobre los datos de sísmica de reflexión**. El resultado son secciones con una escala vertical dada por tiempos de ida y vuelta de la onda electromagnética (en nanosegundos) donde se observan reflectores cuya amplitud es función de los contrastes de la constante dieléctrica entre las distintas capas del substrato. Véase la siguiente ilustración.



(modificado de Neal, 2004)

Adicionalmente pueden hacerse registros en pocitos de algunos metros para ajustar la puesta en profundidad, resultando **radargramas** de pozo análogos a la sísmica de sondeos petroleros. E igualmente se puede hacer **registros 3D**, o sea volúmenes de información comparables a una mini sísmica tridimensional.

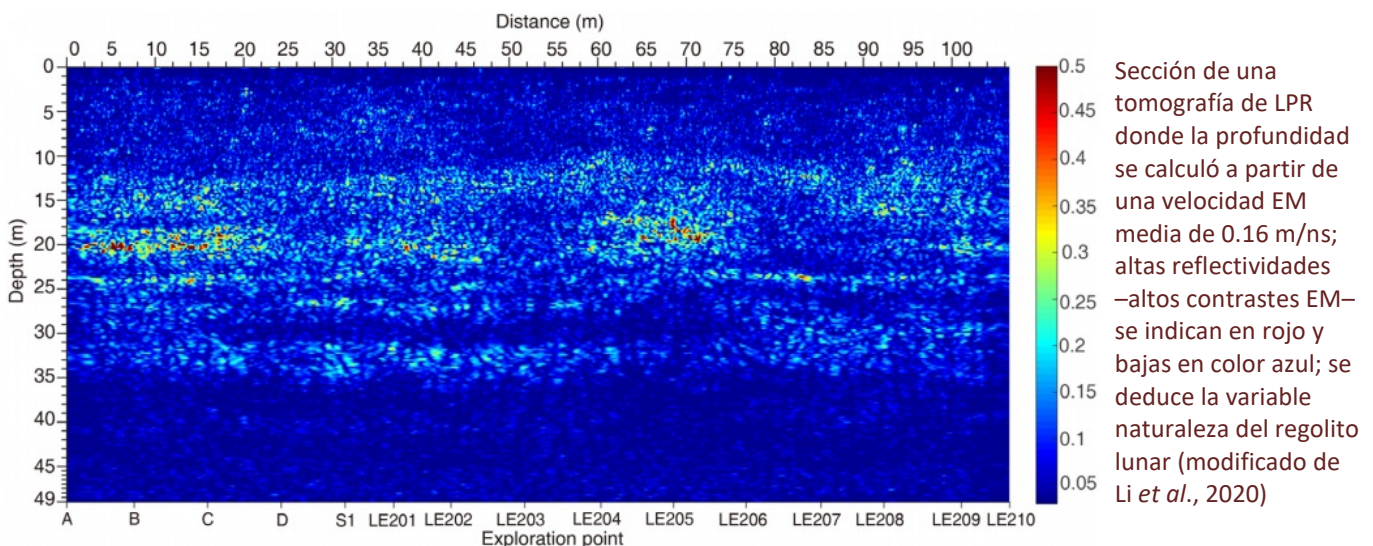
Dado que la permitividad es muy sensible al agua –ésta tiene un valor muy alto de la constante, debido el carácter fuertemente dipolar de sus moléculas– el georradar ha sido muy utilizado en áreas de suelos congelados para iluminar por debajo de hielo o permafrost (*permafrost*), aunque también en otros diversos ambientes geológicos, con objetivos de investigación hidrogeológica, ambiental, minera, paleontológica, arqueológica o estratigráfica (como el caso de la figura siguiente en la bahía Bustamante, Chubut).



Aplicación de georradar; sobre fondo negro la interpretación (gentileza de José Allard y Alejandro Montes, 2008)

También es utilizado para aplicaciones a la **geología forense** (es decir del foro judicial), porque un cadáver enterrado es denunciado por el georradar como un pequeño sector con más agua que el entorno. Hay antecedentes en muchos países en años recientes y en Argentina ha sido empleado en la búsqueda de desaparecidos, como los casos de Julio López o de Marita Verón (todavía sin éxito) y también en el hallazgo del cuerpo del brigadier Juan B. Bustos, bajo el presbiterio de la iglesia de Santo Domingo en Santa Fe. (Bustos luchó durante las invasiones inglesas, fue el primer gobernador constitucional de Córdoba en 1820, colaboró con Belgrano en el Ejército del Norte y en 1830 falleció a causa de traumatismos de tórax tras una de tantas batallas de la guerra civil contra los unitarios –comandados por el general José M. Paz– que acabarían imponiendo su modelo injustamente porteñocéntrico hasta hoy).

A unos 384.000 km de Santa Fe y de Córdoba, una adaptación del georradar ha sido exitosamente empleada para el estudio del regolito de la superficie selenita (figura siguiente). Las sondas chinas *Chang'e 3, 4 y 5* han llevado un *Lunar Penetrating Radar* cada una, los cuales han proporcionado interesante información nueva sobre la geología (en rigor selenología) de nuestro apedreadísimo satélite natural.



## **CUESTIONARIO BÁSICO**

- Indicar y justificar las condiciones ideales de uso de los métodos de corriente alterna en superficie.
- ¿Cómo es el método electromagnético de inclinación de campo?
- Graficar un diagrama vectorial indicando brevemente su significado.
- Señalar las diferencias entre los métodos de Turam y Slingram.
- ¿Qué opciones y ventajas tiene la prospección EM aérea?
- ¿Qué parámetros permiten variar la profundidad de investigación?
- Explicar brevemente los sondeos de frecuencia y los registros hertzianos.
- Qué tipos de tomografías EM en el dominio del tiempo pueden efectuarse.
- Comentar aplicaciones de los métodos electromagnéticos.
- ¿Cuáles son los fundamentos del georradar?
- Referir aplicaciones prospectivas del georradar.

## **BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA**

- Beard, L. & Nyquist, J., 1998. Simultaneous inversion of airborne electromagnetic data for resistivity and magnetic permeability. *Geophysics*, V.63 N°5 (p 1556-1564).
- Burger, H., 1992. *Exploration geophysics of the shallow subsurface* (p 310-311). Prentice-Hall.
- Cantos Figuerola, J., 1972. *Tratado de geofísica aplicada* (p 420-422, 429-431). Librería de Ciencia e Industria.
- Dobrin, M., 1976. *Introduction to geophysical prospecting* (p 601-622). McGraw-Hill.
- Griffiths D. & King, R., 1972. *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos* (p 212-215). Editorial Paraninfo.
- Huang, H. & Fraser, D., 1999. Airborne resistivity data leveling. *Geophysics*, V.64 N°2 (p 323-649).
- Jol, H., 2009. *Ground penetrating radar: theory and applications* (543 p). Elsevier.
- Korhonen, K., Ruskeeniemi, T., Paananen, M. & Lehtimäki, J., 2009. Frequency domain electromagnetic soundings of Canadian deep permafrost. *Geophysica*, V.45 N°1-2 (p 77-92).
- Legault, J., 2015. Airborne electromagnetic systems; state of the art and future directions. *C.S.E.G. Recorder*, N°6 (p 38-49).
- Li, C., Su, Y., Pettinelli, E., Xing, S., Ding, C., Liu, J., Ren, X., Lauro, S., Sodovieri, F., Zeng, X., Gao, X., Chen, W., Dai, S., Liu, D., Zhang, G., Zuo, W., Wen, W., Zhang, Z., Zhang, X. & Zhang, H., 2020. The Moon's farside shallow subsurface structure unveiled by Chang'e 4 lunar penetrating radar. *Science Advances*, V.6, N°9 (8 p).
- Liang, S., Sun, S. & Lu, H., 2021. Application of airborne electromagnetics and magnetics for mineral exploration in the Baishiquan–Hongliujing area, Northwest China. *Remote Sensing*, V.13 N°903 (15 p).
- Lowrie, W., 1997. *Fundamentals of geophysics* (p 219-225). Cambridge University Press.
- McNeill, J., 1990. Use of electromagnetic methods for groundwater studies. En *Geotechnical and Environmental Geophysics*, V.1 (p 191-218); Ward, S. Ed. Society of Exploration Geophysicists, IG N°5.
- Neil, A., 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, N°66 (p 261–330).
- Paine, J., Dutton, A., Mayorga, J. & Saunders, G., 1997. Identifying oil-field salinity sources with airborne and ground-based geophysics: a West Texas example. *The Leading Edge*, V.16 N°11 (p 1603-1607).
- Parasnis, D., 1971. *Geofísica minera* (p 111-163, 314-344). Editorial Paraninfo.
- Parshin, A., Bashkeev, A., Davidenko, Y., Persova, M., Iakovlev, S., Bukhalov, S., Grebenkin, N. & Tokareva, M., 2021. Lightweight unmanned aerial system for time-domain electromagnetic prospecting; the next stage in applied UAV. *Geophysics, Applied Sciences*, V.11 N°2060 (26 p).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. *Basic exploration geophysics* (p 490-500). John Wiley & Sons.
- Serson, P., 1973. Instrumentation for induction studies on land. *Physics of the Earth and Planetary Interior*, V.7 N°3 (p 313-322).

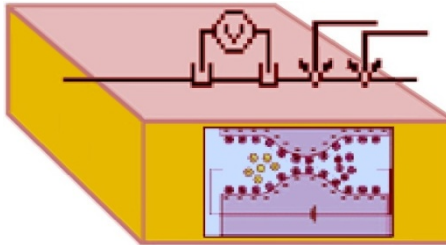
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Tarkhov, A., 1962. Электроразведка методом радиокипа (*Electrical prospecting using the Radiokip method*). Разведка и охрана Недр (*Exploration and Protection of Subsoil*) N°1 (p 29-34).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 500-631). Cambridge University Press.

**Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.**

“... your goals are to leave a better world than you found it...”

[“...tus metas deben ser dejar un mundo mejor del que encontraste...”]

Arthur Albert Brant (1987)



Boceto conceptual de P. I.

## MÉTODOS DE POLARIZACION INDUCIDA

Hijo único, Arthur nació en un hogar humilde de Toronto en 1910, descendiente directo de Joseph Brant (cuyo nombre original era Thayendanegea), legendario cacique de los Mohawk. Tras las guerras con los franceses, ingleses, aborígenes y estadounidenses, Canadá llevaba cuatro décadas independiente, pero la discriminación hacia los habitantes originarios todavía era muy acentuada. (Mientras en el otro extremo de América la oligarquía argentina celebraba el centenario de la Revolución de Mayo bajo estado de sitio para reprimir obreros explotados, y con la servidumbre semiesclava de miles de mujeres y niños sobrevivientes a las masacres ordenadas por Julio A. Roca y la oligarquía enriquecida con millones de hectáreas sustraídas a los aborígenes).

**Arthur Brant** tenía sólo un año cuando **Conrad Schlumberger** comenzó en 1911 en Francia los primeros planteos con polarización inducida (PI o PP, *polarisation induite* o *p. provoquée*), luego discontinuados hasta 1920 a causa de la Primera Guerra Mundial. Y todavía cursaba en la Uni en Toronto cuando el ruso **A. S. Semenov** y otros ya hacían sus propios abordajes para petróleo en Chechenia y Azerbaiyán, al norte del Cáucaso, desde 1929. Arthur obtuvo los máximos honores en matemática y física al laurearse en 1932, fue gran jugador de hockey sobre hielo, se doctoró en Berlín en 1936 y fue entrenador del primer seleccionado alemán de hockey en las olimpiadas de ese año en las que Hitler buscaba demostrar la superioridad de la “raza aria” (aunque en ese nuevo deporte tuvo que aceptar a un morocho canadiense como DT). En la misma Alemania **Max Müller** publicaba por esos años sus investigaciones sobre polarización inducida. Pero, antes de estallar la Segunda Guerra Mundial, Arthur ya estaba de vuelta en Toronto haciendo sus propios experimentos de laboratorio donde descubrió parte de los fundamentos de la PI en el dominio del tiempo, y también viajó al noroeste canadiense donde perfeccionó aplicaciones radiométricas aéreas.

En paralelo y bajo estricto secreto, **William Rooney** y **William Keck** del U. S. Naval Ordnance Laboratory (artillería) idearon una técnica en la que buzos tácticos podían arrastrar un dispositivo para localizar mediante PI las minas bélicas escondidas en las playas –para así tener desembarcos anfibios más seguros en territorios enemigos– detectables por la acumulación de cargas eléctricas que se produce entre la humedad del suelo y el metal de una mina antipersonal o antitanque (diseñadas para explotar por presión a fin de causar sobre todo heridos graves y mutilados para complicar y desmoralizar al enemigo... porque los humanos somos una joyita evidentemente incompatible con un dios creador supuesto bondadoso y omnipotente).

Tras la guerra, **David Bleil**, que había colaborado con los William como estudiante, probó la técnica con el U.S. Geological Survey en áreas mineralizadas, vio que daba,



Explotación minera en Jerome, Arizona, *circa* 1950  
(foto [miningartifacts.org](http://miningartifacts.org))

y la bautizó IP (*induced polarization*). El gerente general de la Newmont Mining Corporation había formado parte del War Production Board del presidente Roosevelt. Corría el año 1946 y **Arthur Brant** fue llamado como consultor por sus avances hechos en la Universtiy of Toronto. Y desde 1949 colideró un equipo en Jerome (Arizona), un área de minas de cobre en sulfuros diseminados, junto a los canadienses **Harold Seigel** y **James Wait**, ambos también de Toronto –Canadá es líder en geofísica minera mundial–. Seigel fue cofundador de la compañía Scintrex y logró 21 patentes en PI, EM, etc. Wait hizo grandes aportes al EM y las telecomunicaciones. A ellos siguieron el estadounidense **Ted Madden** (del Massachusetts Institute of Technology, pionero de la PI en el dominio de la frecuencia), el ruso **Victor Vacquier** (del New Mexico Institute of Mining and Technology), el también ruso **Vladimir Komarov** (de la Ленинград университет, Universidad de Leningrado, hoy San Petersburgo) y muchos otros.

Hacia 1960 Brant condujo la exitosa exploración con PI en Cuajone, gran mina de cobre porfírico a 3.500 msnm en la cordillera Occidental del sur de Perú, cuya explotación a cielo abierto comenzó en 1970. Arthur fue un tipo muy activo, más en temas prácticos que en docencia, a la que igualmente se dedicó mucho. Tenía poco respeto por abogados, banqueros, contadores y políticos, y gran aprecio por los granjeros, petroleros, mineros y en general todos quienes producen valor agregado y no especulación. Casado con Lilli Umbach, pintora retratista, tuvieron una hija que se laureó en teología y falleció a los cuarenta y tres años.

Brant obtuvo 14 patentes en diversos métodos, incluyendo EM aéreo con la Newmont en 1956 y EM en el dominio del tiempo en 1966, testado exitosamente en Chipre (antes de que la isla sufriera la invasión turca de 1974 que separó la parte norte del resto, que siguió griega). También ayudó a desarrollar la RMN y la tecnología satelital (*Landsat*). Recibió medallas y honores a la excelencia científica y falleció en 2002, a los noventa y dos años en Tucson, Arizona, cuando, aunque había bajado un cambio, el viejito todavía conducía por la ruta de la geofísica. Lilli murió tres años después.

## FUNDAMENTOS DE LA POLARIZACIÓN INDUCIDA

La polarización inducida es el fenómeno que se verifica al desconectar una batería situada entre dos electrodos conectados al terreno. Se trata de un **decrecimiento gradual de la tensión una vez desconectada la batería**, fenómeno análogo al de un condensador eléctrico. Implica que algún movimiento de iones se vea impedido y la PI aparece como una posterior difusión de iones. Alternativamente se verifica **una variación de resistividad cuando ésta es medida en un medio dado utilizando corrientes de distinta frecuencia**.

Existen dos modos de crear este fenómeno:

### - Polarización de electrodos:

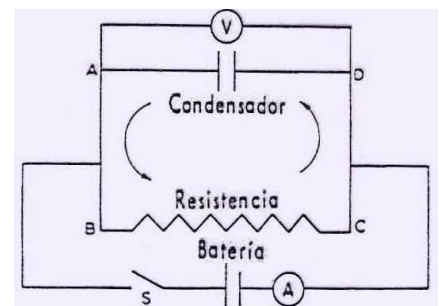
Por cargas iónicas acumuladas en el límite electrolito-partícula metálica, las cuales crean una tensión que se opone al flujo, por lo que, cuando la corriente se interrumpe, queda un potencial residual debido a las cargas iónicas allí retenidas (figura, caso A). Este potencial luego decrece continuamente al difundirse las cargas en los electrolitos porales –igual a lo que sucede con los electrodos A y B si no son impolarizables–. Arriba puede verse el análogo eléctrico de este proceso.

### - Polarización de membrana:

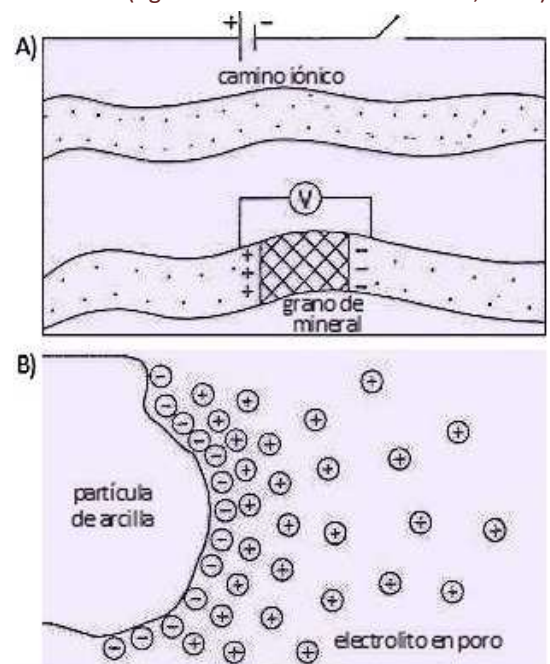
Se produce por la presencia de partículas de arcilla (figura, caso B), silicatos laminares cuyos reemplazos de cationes de Al, Fe, Mg, etc. adsorben cargas negativas en su superficie y por lo tanto atraen iones positivos de los electrolitos. Cuando se hace pasar una corriente los iones positivos se desplazan, y al interrumpirse ésta se redistribuyen generando una tensión decreciente entre los dos electrodos en contacto con la arcilla.

## PROSPECCIÓN MEDIANTE P. I.

Con los mismos dispositivos electrónicos empleados para prospectar con corrientes continua (dipolares, polo-dipolo o



Circuito eléctrico análogo al fenómeno de la P.I. (figuras modificadas de Parasnis, 1971)



A) polarización de electrodos en contactos mineral-electrolitos. B) polarización de membrana en arcillas.

cualquiera de los otros vistos, según lo aconseje cada caso particular) en la PI se efectúan *calicatas con una o varias profundidades de interés* (como en las tomografías eléctricas). Existen variantes prospectivas en dos dominios diferentes, con significativos progresos técnicos plasmados desde 1990.

**En el Dominio del Tiempo**

Se inyecta al terreno una corriente continua y se registra el decrecimiento de la tensión entre los electrodos de potencial después de haber cortado la corriente (véanse las tres figuras sucesivas). Pueden medirse:

**- Polarizabilidad (polarizability,  $\eta$ ):**

cociente entre la tensión residual  $V_i$  en un instante determinado después del corte de la corriente (en milivoltios) y la tensión normal  $V_o$  (en voltios) mientras la corriente fluye.

$$\text{Es decir: } \eta = mV_i/V_o$$

O alternativamente:  $\eta = mV_i \cdot 100/mV_o$

(en % midiendo  $mV_o$  en milivoltios)

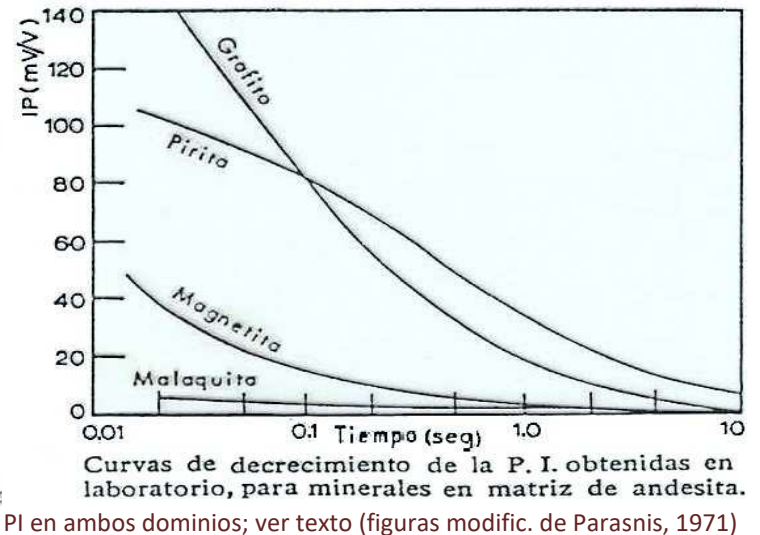
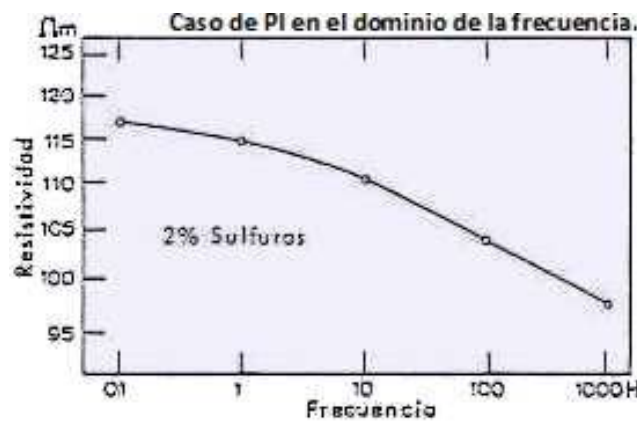
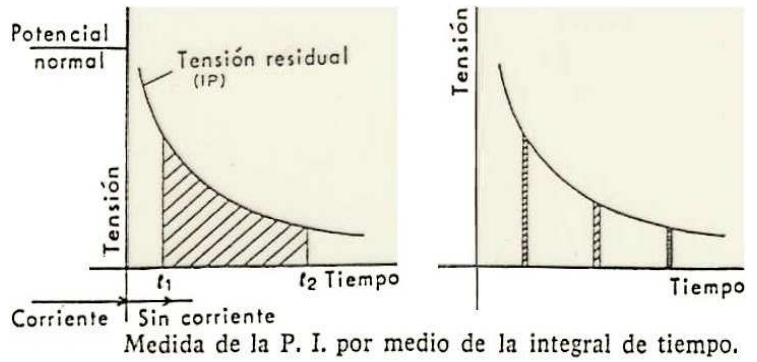
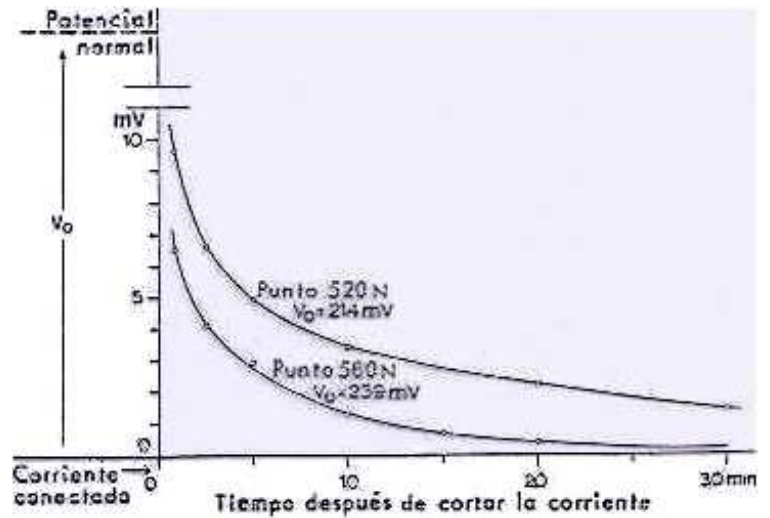
**- Cargabilidad (chargeability,  $m$ ):**

se registra la curva de descenso durante un cierto lapso y se calcula el área debajo de ella entre dos límites de tiempo, que se divide por el potencial normal  $V_o$ , con lo que se obtiene la medida de la integral de tiempo de la PI, según la expresión:

$$m = (1/V_o) \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt$$

Alternativamente puede definírsela como la más simple relación:

$$m = (V_o - V_i) / V_o$$



**En el Dominio de la Frecuencia**

En esta modalidad se mide la variación de la resistividad aparente del terreno en función del cambio de frecuencia de la corriente aplicada (figura de la izquierda para una muestra que contiene 2% de sulfuros).

El pasaje del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia (y viceversa) puede hacerse matemáticamente mediante la **transformada de Laplace** (desarrollada por el ya citado matemático y astrónomo francés), análogamente a los datos de RMN de pozo (Tema 05). A diferencia de la transformada de Fourier, la integral inicia en cero y en la exponencial se tiene un número complejo.

Su expresión analítica es:  $F(r) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-rt} dt$

Se muta de magnitudes (en este caso voltajes) en función del tiempo a otras magnitudes (para este fin ahora resistividades) en función de una frecuencia angular compleja.

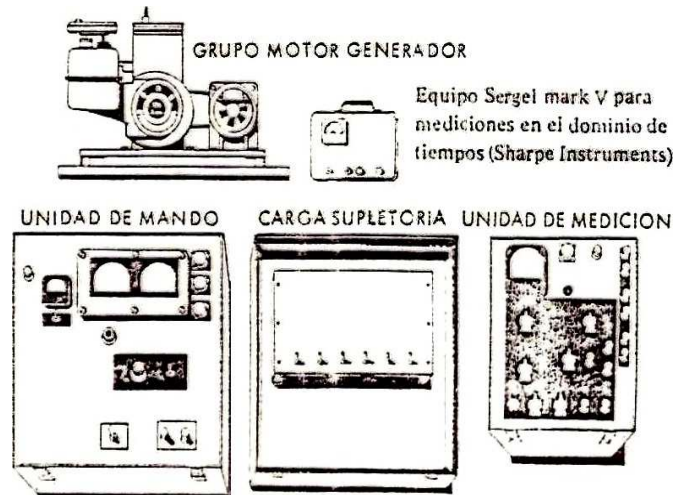
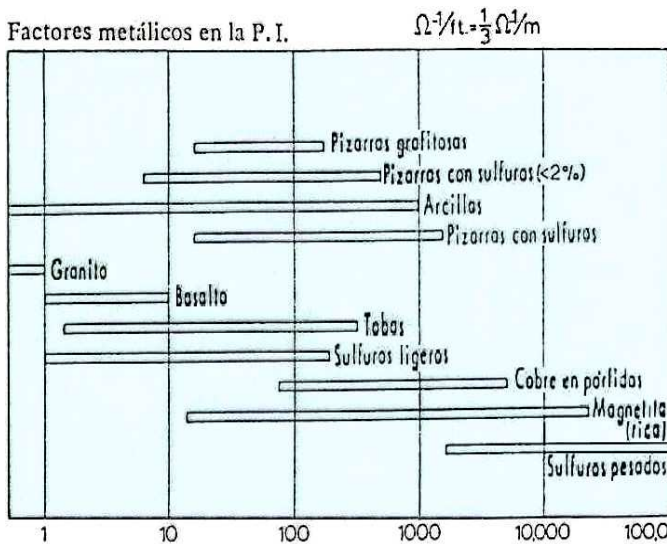
Aplicándola se puede mostrar la equivalencia de una resistencia  $r$  y un condensador en función de sus condiciones iniciales, por lo cual las anomalías de polarización inducida en los dominios de la frecuencia y del tiempo  $t$  son equivalentes.

En la práctica, en el dominio de la frecuencia se procede a determinar la resistividad a dos frecuencias, una de ellas muy baja y la otra más alta. Pueden medirse:

- **Efecto de Frecuencia, e.f. (frequency effect, f.e.):** la resistividad de las rocas decrece al aumentar la frecuencia aplicada. La medida de la PI en función de la frecuencia se define como la diferencia entre la  $\rho$  con CC y con CA, dividido por la resistividad con CA, es decir:  $e.f. = (\rho_{CC} - \rho_{CA}) / \rho_{CA}$

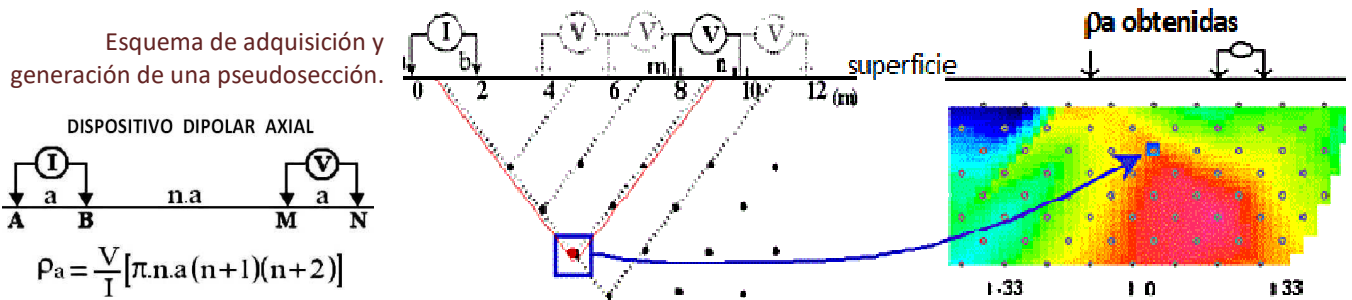
En la prospección, dado que se trabaja con un alternador (o sea, sólo CA), la  $\rho_{CC}$  es en verdad una  $\rho_{CA}$  pero de sólo 0,1 Hz, que en la práctica equivale a una  $\rho_{CC}$ . La  $\rho_{CA}$  suele ser de unos 10 Hz.

- **Factor Metálico, FM (Metalic Factor, MF):** es un parámetro ideado para corregir la influencia de la resistividad de la roca de caja. Se define como el efecto de la frecuencia dividido por la  $\rho$  aparente en CC (en la práctica es una CA de 0,1 Hz) multiplicado por un factor numérico arbitrario para dar resultados no tan pequeños. La expresión matemática de esta magnitud es:  $FM = 2\pi \cdot 10^5 (\rho_{CC} - \rho_{CA}) / (\rho_{CC} \cdot \rho_{CA})$



(figuras modificadas de Parasnis, 1971)

Puede graficarse la curva de  $\rho_a$  junto con la de  $\eta$ ,  $m$ , e.f. ó MF para una calicata a profundidad constante (primer caso de la siguiente página). O bien, con varias separaciones interelectródicas, tener datos para generar una **pseudosección de profundidades arbitrarias** mediante la técnica de atribución que acá se ilustra, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia.



### Aplicaciones convencionales de la polarización inducida

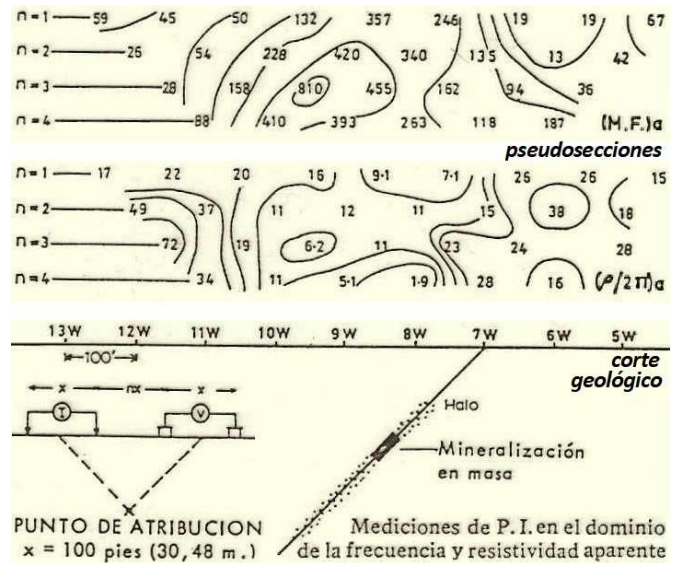
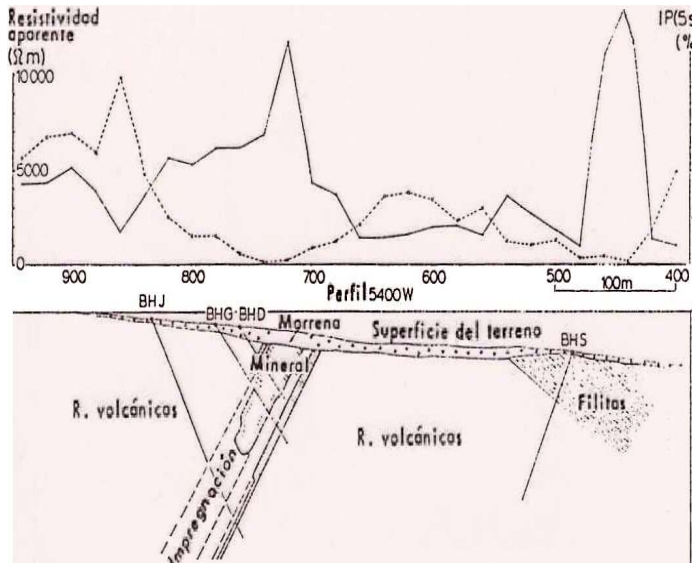
Son muchas las aplicaciones, incluyendo las referidas a **hidrogeología, medioambiente, ingeniería civil y arqueología**. Es muy usada para mineralizaciones metalíferas, sobre todo para sulfuros diseminados (caso de los yacimientos de cobre y oro porfírico), pero también si son masivos con dispositivos por gradiente. Si en cambio se requiere prospeccionar filones subverticales, dan mejores resultados los arreglos dipolares. Modernos dispositivos multicanal permiten optimizar la adquisición, incluso 3D.

**GLOSAS DE GEOFÍSICA**

**Tema 08: Métodos de Polarización Inducida**

*Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., Ledesma Vallvé, M., Costantino, D., Cid de la Paz, M., Guerra, G., 2025.*

*Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.*

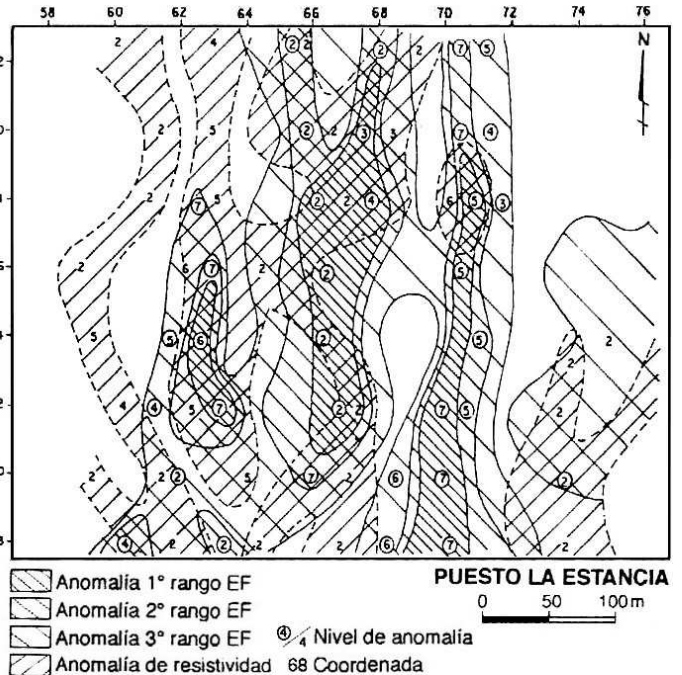
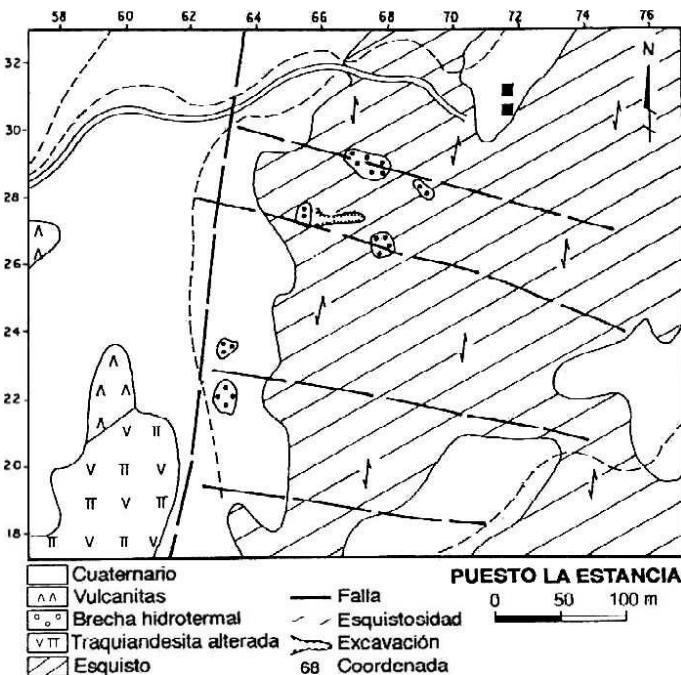
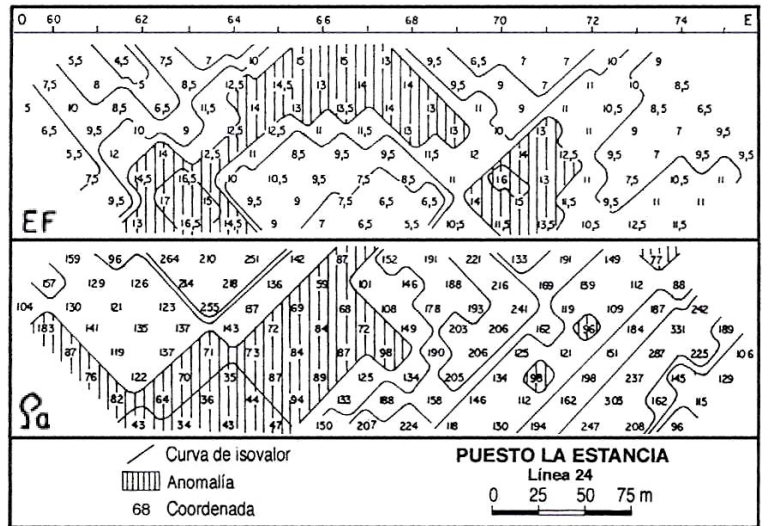


P. I. en el dominio de tiempos (curva continua) y resistividad aparente Wenner (curva de trazos) sobre el yacimiento de sulfuros de Kankberg, Suecia.

(figuras modificadas de Parsnis, 1971)

Aquí se presentan tres casos de aplicación minera. En todos ellos puede apreciarse la correspondencia inversa que generalmente se verifica entre la resistividad aparente y el parámetro de polarización inducida elegido (dominio temporal el primero, de frecuencias los otros dos), cotejo que es muy útil a los fines interpretativos. Son tres secciones y abajo dos mapas. El caso de San Luis se registró con un arreglo dipolar en un distrito minero con sulfuros diseminados que contienen una mineralización polimetálica, también oro, en brechas epitermales alojadas en esquistos, piroclastitas y rocas volcánicas.

PI en La Carolina, San Luis (modificado de Carotti, 1993)

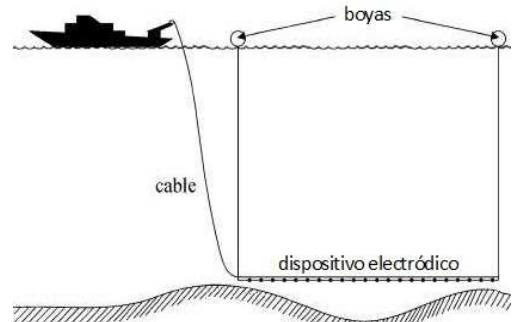


La prospección también es posible desde lanchas o gomones arrastrando el arreglo electródico por el lecho de un río, lago o mar (esquema adyacente, como en inyección de corriente, Tema 07), aunque se trata de un ámbito poco habitual para la adquisición de la PI.

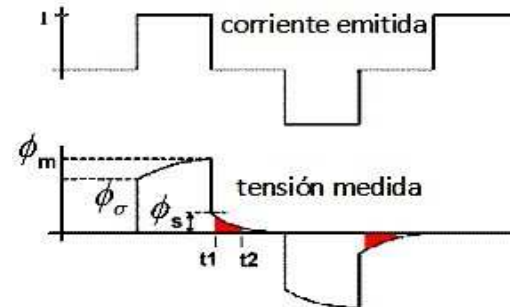
**PI Espectral** (*Spectral Induced Polarization, SIP*)

Fue así bautizada por el canadiense **James Wait**, uno de sus precursores, y mide la variación de resistividad con distintas frecuencias (que van desde kHz a MHz). **Puede registrarse directamente en el dominio de las frecuencias, o bien medir en el dominio del tiempo y luego pasar los datos a frecuencias mediante la transformada de Laplace. Se cuantifican dos variables, la amplitud (también llamada resistividad) y la fase**, tal como se hace en el método magnetotelúrico (MT), aunque aquí con una metodología un tanto diferente, pudiéndose además separar componentes reales e imaginarias (desfasadas 90°, es decir en cuadratura temporal). A la derecha procedimiento habitual consistente en aplicar sucesivas corrientes de cierta intensidad y signo inverso y registrar las resultantes curvas de decrecimiento durante los tiempos de espera intermedios, con identificación de magnitudes de fase  $\phi$  e intervalos temporales  $t$ .

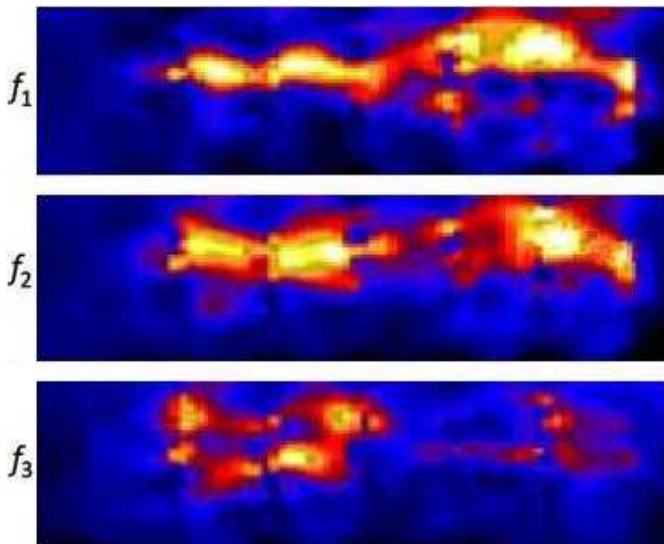
Abajo se ve una misma pseudosección o tomografía adquirida (y procesada) con distintas frecuencias: **la polarización inducida aumenta con la frecuencia, pero la proporción con que sucede depende de los minerales y fluidos del subsuelo**. A la derecha se ilustra el espectro de fase (miliradianes) versus frecuencia (hercios) en arenas de distinta compactación de un acuífero de Almería, vecino a la costa mediterránea andaluza. En SEV con inyección de corriente se presenta un caso de esta misma área (pág.163).



Esquema de adquisición bajo el agua

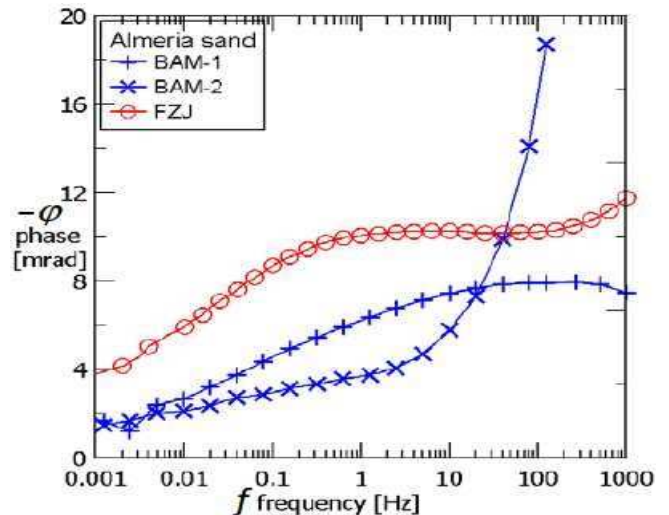


Emisión y recepción para la PI espectral.



Tomografía, variación espacio-espectral. Almería, España.

(figuras modificadas de Kemna et al., 2012)

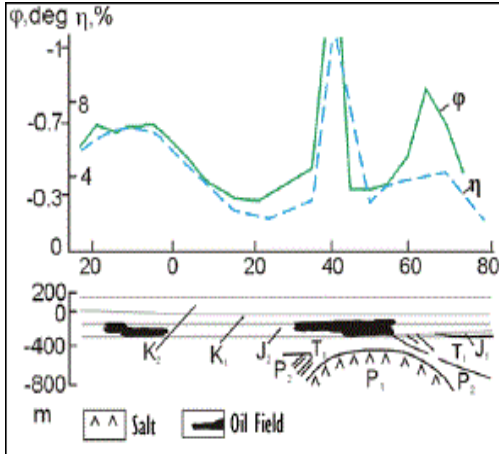
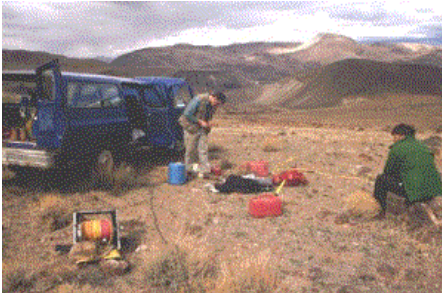


Espectro de polarización inducida de una arena en un acuífero. FZJ: muestra muy compactada

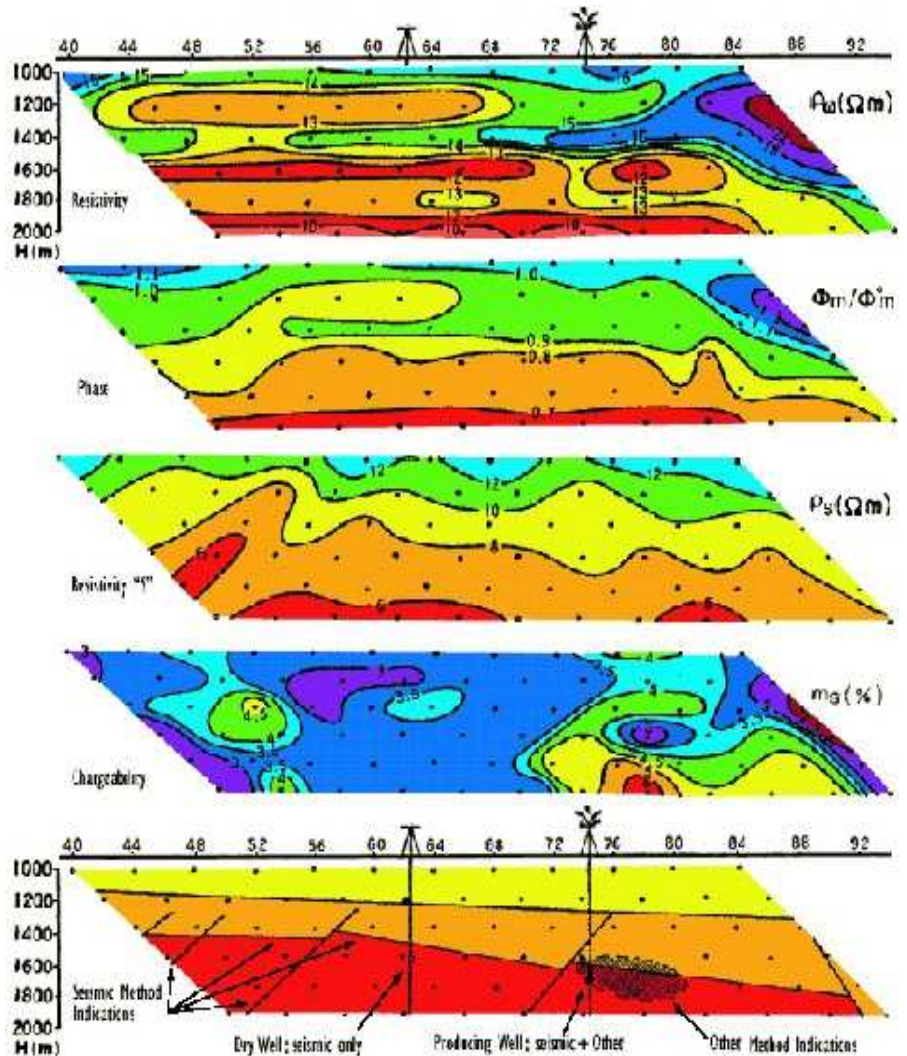
BAM-1: muestra poco compactada

BAM-2: muestra suelta, no optimizada

**La PI espectral puede ser útil para definir parámetros de emplazamientos geológicos polarizables.** Sirve en la **discriminación de grafito y arcilla de las mineralizaciones sulfurosas de interés metalífero**, a veces da información sobre el **hábito de ciertos minerales**, otras veces sobre **salinidad o saturación de fluidos**, o **aspectos geoquímicos o medioambientales**, y es útil en la **identificación de hidrocarburos**, tanto gas como petróleo por su contraste resistivo. En algunos casos se ha conseguido una importante profundidad de investigación para inferir la presencia de reservorios, siempre que éstos no tengan poco espesor, tal como se ilustra en las figuras de la página siguiente.

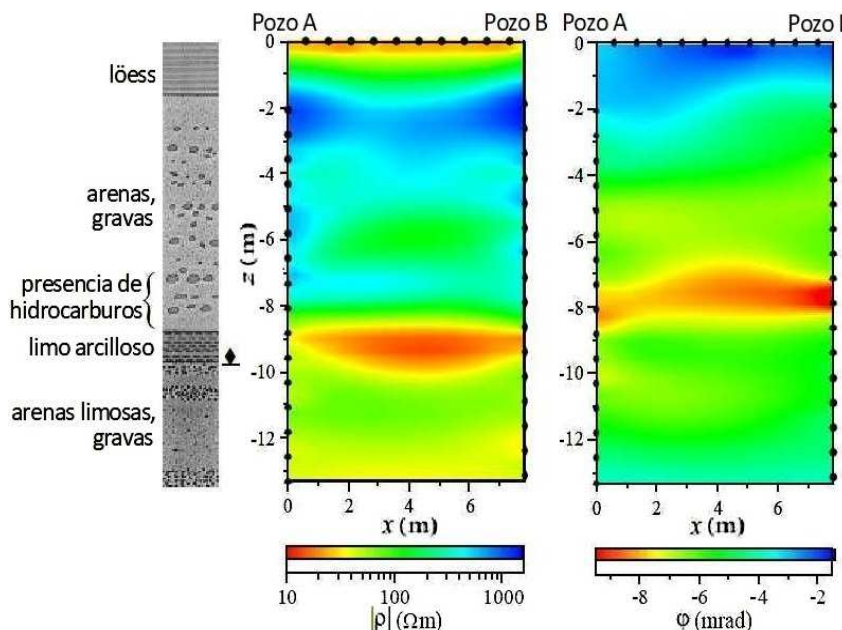


Arriba, foto del trabajo en el campo y ejemplo de prospección por PI en el dominio del tiempo, más PI espectral. Derecha, en China, PI en el dominio de la frecuencia más espectral; en rojo menores  $\rho$  y mayores  $m$  y  $\phi_{re}/\phi_{im}$ . (figuras de Phoenix Geophysics)



Otras variantes de la PI

En 1970 el canadiense **Harold Seigel** propuso *medir el campo magnético en simultáneo con la PI*, dando lugar a la variante PIM (o en inglés *MIP*) que ha resultado útil en casos de mineralizaciones por debajo de formaciones de alta conductividad, particularmente bajo rocas que contienen aguas muy saladas, como ocurre en Australia y otros países.



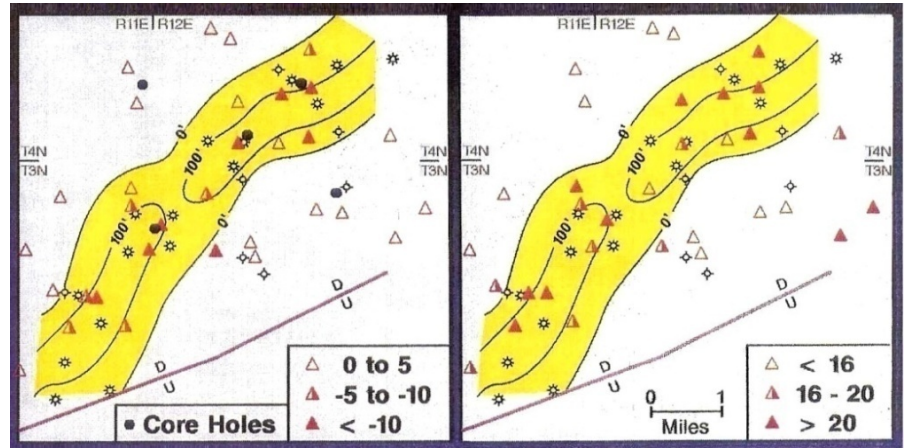
Asimismo, se ha recurrido a la aplicación de PI ocasionalmente en **perfiles de pozos**, ya desde las primeras experiencias hechas por el ruso **V. N. Dakhnov** en 1959, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia y en años recientes en su variante espectral, incluso entre pozos que pueden ser profundos o muy someros, como el siguiente caso de evaluación de una contaminación sub-superficial con hidrocarburos.

Registro de polarización inducida entre dos pocitos superficiales; se identifica un sector con presencia de hidrocarburos en los sedimentos (modificado de agiusa.com)

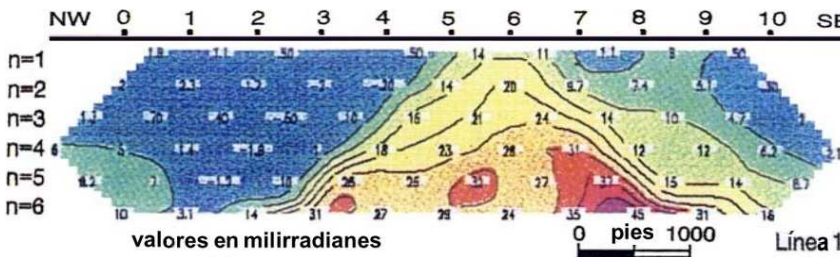
### MÉTODOS GEOELÉCTRICOS Y GEOQUÍMICA

En no pocas regiones los métodos geoelectrónicos resultan ser sensibles a las características geoquímicas de los terrenos, constituyendo así una muy útil herramienta prospectiva.

De especial interés son los resultados de la *geoelectrónica como complemento del mapeo de la alteración geoquímica de los suelos causada por la presencia de hidrocarburos* y de los compuestos químicos asociados sobre sus áreas de entrapamiento, *por ejemplo por la presencia de pirita, como*



**Polarización inducida** **Resistividad aparente**  
 Los hidrocarburos que manaron desde un paleocanal de areniscas del Pensilvaniano han producido la formación de pirita autigénica y calcita en niveles subsuperficiales. Esta mineralización causa marcadas anomalías eléctricas. Véase la buena correspondencia entre los datos geoelectrónicos (triángulos) y los sectores más productivos desde el subsuelo (mapa isopáquico del reservorio en amarillo). Yacimiento de gas Ashland, cuenca de Arkoma, U.S.A. (modificado de Oehler & Sternberg, 1984)

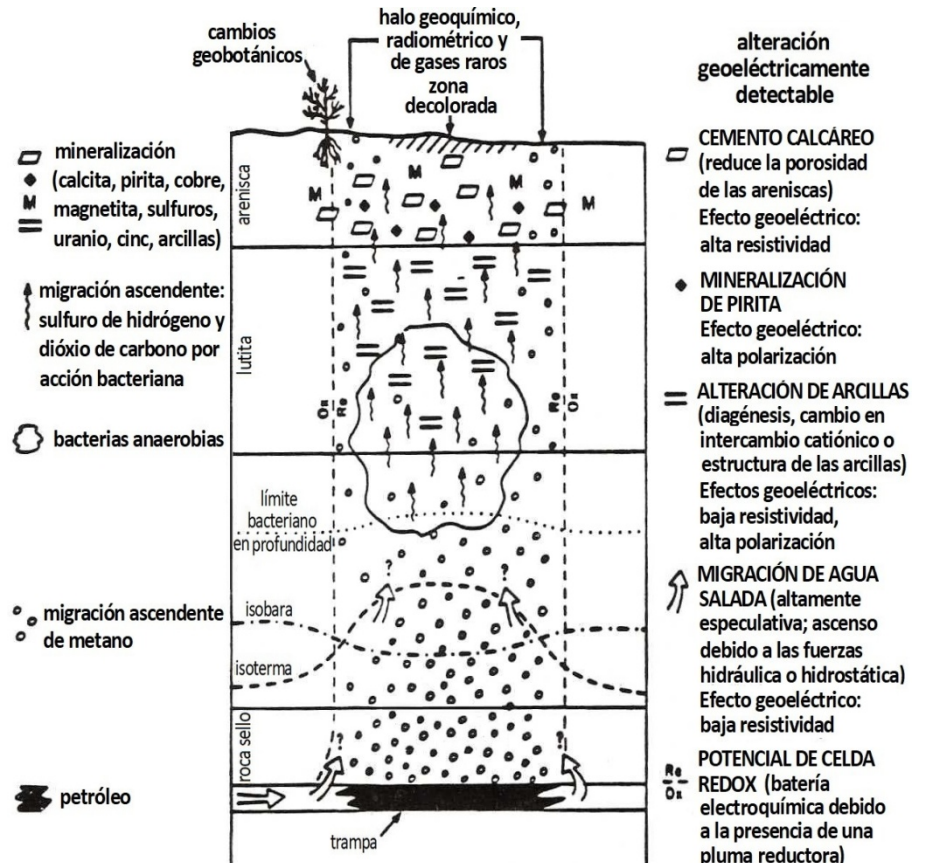


Condado de Garza, Texas; pseudosección de PI representada con valores de fase  $\phi$  cuyos máximos, en colores cálidos, denuncian alteraciones geoquímicas cuyo tope está a unos 230 m bajo la superficie, causadas por micromanaderos de hidrocarburos desde un yacimiento profundo de la cuenca Midland (modificado de Carlson & Zonge, 1996)

también de magnetita y de otros varios semiconductores generados como subproducto de la dieta de las bacterias que se nutren de petróleo y así lo biodegradan. En 1954 el ruso A. A. Kartsev y colaboradores fueron pioneros en estudiar esto. Véase también Price, 1985.

Arriba se ilustra un ejemplo de los Estados Unidos, donde se compara el mapeo isopáquico de un reservorio profundo con las respuestas someras entregadas por la polarización inducida y la resistividad aparente. Debajo de él se reproduce una calicata que fue registrada sobre otra área petrolífera estadounidense cuyas anomalías corresponden también al escape de hidrocarburos desde trampas profundas.

En el esquema general de la derecha se resumen las posibles aplicaciones de los diversos métodos geoelectrónicos que se orientan a localizar zonas con



(modificado de Hughes et al., 1986)

potenciales manaderos de hidrocarburos a partir de los múltiples efectos geoquímicos que pueden producirse a poca profundidad a raíz de tales microfugas.

Se trata, claro, de fugas de información sensible para los sabuesos del petróleo.

## CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Cuáles son las dos causas del fenómeno de polarización inducida?
- ¿Cómo opera el método en el dominio del tiempo y qué se mide?
- ¿En qué se fundamenta el dominio de la frecuencia y cómo se hacen las mediciones?
- ¿Cómo se adquieren y representan usualmente los datos de campo?
- ¿Qué ventaja tiene registrar PI espectral?
- Mencionar otras variantes prospectivas con polarización inducida.
- ¿Qué aplicaciones tiene el método de PI?
- Comentar la vinculación entre geoeléctrica y geoquímica.

## BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Burger, H., 1992. Exploration geophysics of the shallow subsurface (p 308-309). Prentice-Hall.
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 422-429). Librería de Ciencia e Industria.
- Carotti, M., 1993. Polarización inducida en el distrito de La Carolina, San Luis, Argentina. XII Congreso Geológico Argentino. Actas, V 1 (p 248-254).
- Carlson, N. & Zonge, K., 1996. Induced polarization effects associated with hydrocarbon accumulations: minimization and evaluation of cultural influences. En Hydrocarbon migration and its near-surface expression (p 127-138). Schumacher, D. & Abrams, M. Eds, American Association of Petroleum Geologists, Memoir 66.
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 601-622). McGraw-Hill.
- Hughes, L., Zonge, K. & Carlson, N., 1986. The application of electrical techniques in mapping hydrocarbon-related alteration (p 5-26). En Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas, symposium IV. Davidson, M. Ed., Southern Methodist University Press.
- Kartsev, A., Mogilevsky, G., Subbota, M. & Tabasaranskii, Z., 1954. Геохимические методы поисков и разведки нефтяных и газовых месторождений (429 p) (*Geochemical methods of prospecting and exploration for petroleum and natural gas*). Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы (*State Scientific and Technical Publishing House of Oil, Mining and Fuel Literature*).
- Kemna, A., Binley, A., Cassiani, G., Niederleithinger, E., Revil, A., Slater, L., Williams, K., Flores Orozco, A., Haegel, F., Hoerdt, A., Kruschwitz, S., Leroux, V., Titov, K. & Zimmermann, E., 2012. An overview of the spectral induced polarization method for near-surface applications. Near Surface Geophysics, V.10 N°6 (p 453-468).
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 217-219). Cambridge University Press.
- Oehler, D. & Sternberg, B., 1984. Seepage-induced anomalies, "false" anomalies and implications for electrical prospecting. A.A.P.G. Bulletin, V.68 N°9 (p 1121-1145).
- Orellana, E., 1972. Prospección geoeléctrica en corriente continua (p 79-88). Editorial Paraninfo.
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 206-225). Editorial Paraninfo.
- Price, L., 1985. A Critical overview of and proposed working model for hydrocarbon microseepage. United States Geological Survey, Open-File Report 85-271 (83 p).
- Robinson, E. & Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 478-484). John Wiley & Sons.
- Serson, P., 1973. Instrumentation for induction studies on land. Physics of the Earth and Planetary Interior, V.7 N°3 (p 313-322).
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.

- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. & Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 702-735). Cambridge University Press.
- Veeken, P., Legeydo, P., Davidenko, Y., Kudryavceva, E., Ivanov, S. & Chuvaev, A., 2009. Benefits of the induced polarization geoelectric method to hydrocarbon exploration. Geophysics, V.74 N°2 (12 p).

**Los posibles errores y sesgos contenidos en estas Glosas de Geofísica son sólo atribuibles al primero de los autores.**