

[“...él hincó la piedra, él asperjó gotas...”]

Inscripción Maya (circa 800)

PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA

Una tormenta (eléctrica o no) solía ser bendecida por los ciudadanos de la avanzada civilización Maya. Significaba que prosperarían el maíz y otros cultivos. Y que se recargarían las aguas subterráneas de los cenotes (esos pozos subcirculares creados por el colapso de parte del techo de una gruta calcárea). Acuciados por la creciente escasez de agua potable, los mayas hacían invocaciones, celebraban ritos –como el referido en la inscripción– y ofrendaban sacrificios (incluso humanos) para obtener el favor de Chaak, el dios de la lluvia. Y dado que Chaak les fue brindando cada vez menos respuestas –como nuestro Dios a la inmensa mayoría de los marginados del mundo actual–, los mayas sin duda hubiesen loado el conocimiento de la geoeléctrica que tan útil resulta en la búsqueda de acuíferos y otros recursos subterráneos. (Al final parece que convulsiones sociales generadas a partir de la escasez alimentaria –por falta de lluvias– llevaron al colapso civilizatorio y para 1519, cuando Cortés y sus secuaces llegaron a esas tierras, muchas de las grandes ciudades mayas llevaban siglos cubiertas de selva y los españoles se ahorraron otro estrago a gran escala como el perpetrado contra la pujante cultura Azteca.)

La civilización Maya ya prosperaba cuando en la ciudad o polis de Mileto, en la costa jonia (hoy costa turca sobre el mar Egeo, donde los migrantes pugnan por huir de actuales estragos), un tal Tales afirmaba que el agua es el origen de todo, tiene dioses y vida propia. Pero no sólo eso. Porque dicen que alrededor del 600 a.C. este filósofo griego –que además experimentó con el magnetismo, como ya hemos referido– descubrió que si frotaba un trozo de ámbar (resina vegetal fósil, como la del mosquito de Jurassic Park con el ADN de la sangre de dinosaurios...), éste adquiriría la propiedad de atraer pequeños objetos. **Tales de Mileto** había descubierto la electricidad estática. Ámbar en griego se dice ἤλεκτρον (élektron).

Tres siglos después, hacia el 310 a.C., **Teofrasto de Ereso** documentó en Atenas sus estudios de los diferentes materiales capaces de producir fenómenos eléctricos.

La palabra **electricidad** fue instalada en la modernidad por el inglés **William Gilbert** hacia 1600.

William Watson, también inglés, en 1746 descubrió que el suelo es conductor de corrientes eléctricas. Más tarde, en 1784, como citamos en el Tema 4, el francés **Charles Coulomb** definió la ley fundamental de los campos electromagnéticos, que para el campo eléctrico se escribe:

$$F = K q_1 q_2 / l^2 \text{ –la forma matemática típica de los campos potenciales–}$$

(en el S.I. las cargas **q** están dadas en coulomb y la distancia o longitud conductora **l** en metros, con $K = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{c}^2$ en el vacío).

En Italia hacia 1800 **Alessandro Volta** inventó la primera pila –a partir de los estudios previos del médico, también italiano, **Luigi Galvani**–. Sabemos que la palabra voltio se utiliza para definir la **diferencia de energía potencial** en los campos eléctricos, también llamada **tensión o voltaje**.

Análogamente al magnetismo, el **potencial eléctrico** es: $V = K q_1 / l$

y el **campo eléctrico** deviene: $E = F / q_2 = K q_1 / l^2 = V / l$ (potencial eléctrico sobre longitud)

La **densidad de corriente** es: $J = I / s$ (intensidad eléctrica sobre sección o área del conductor)

El francés **André Ampère** observó que dos cables con corriente se repelen o atraen según la dirección relativa de circulación y en 1826 expuso su teorema: $\oint H ds = J + dD/dt$

(donde el primer término es la integral de superficie cerrada del campo magnético así generado, J la densidad de corriente, D la inducción electrostática y t el tiempo).

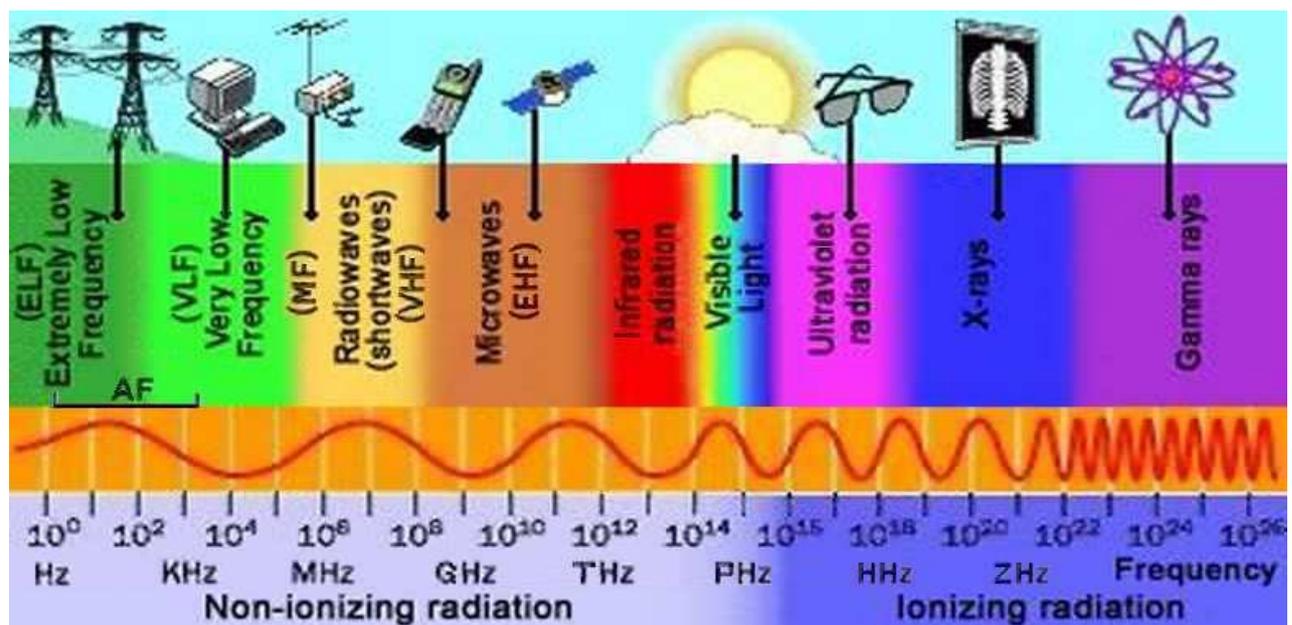
A la inversa, la Ley del inglés **Michael Faraday** y el alemán **Heinrich Lenz** (1831-33) dice que:

$\oint E ds = -dB/dt$ (siendo B el flujo magnético cuya variación temporal genera un campo eléctrico E)

Además el alemán **Karl Gauss** en 1838 descubrió que las líneas de campo eléctrico pueden ir de una a otra carga q, de modo que: $\oint D ds = q$

Y el escocés **James Maxwell** en 1861 halló que las líneas de inducción magnética son continuas, o sea que no puede haber polos aislados y por tanto: $\oint B ds = 0$

Como complemento de este corto repaso de conceptos físicos, una representación abarcativa del espectro electromagnético (del latín *spectrum*, imagen). Nuestros ojos ven una mínima porción, pero con aparatos podemos ver todo. Animales nocturnos o marinos (insectos, roedores, peces, etc.) ven en ultravioleta cercano.



METODOLOGÍAS DE PROSPECCIÓN

Los métodos geoeléctricos se fundamentan en el registro o adquisición de magnitudes eléctricas del campo electromagnético en el suelo y subsuelo terrestre, las que, una vez procesadas (correcciones o reducciones) podrán ser interpretadas para conducir a la identificación de valores anómalos vinculados a objetivos de interés científico o perentoriamente aplicados.

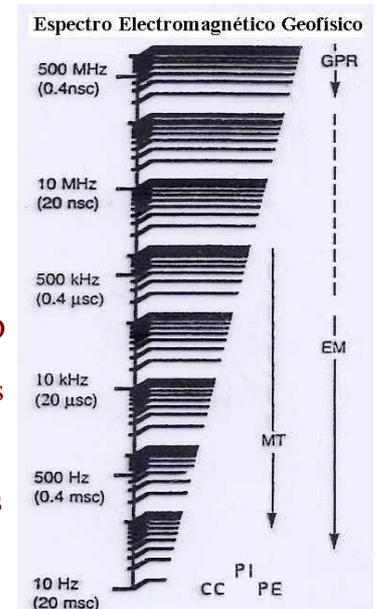
El investigador ruso **E.I. Ragozin** publicó en San Petersburgo en 1903 un trabajo pionero acerca del uso de la electricidad en investigaciones de cuerpos rocosos mineralizados.

En las variantes prospectivas de la geoelectricidad pueden aprovecharse las respuestas dadas a partir de los campos eléctricos naturales de la Tierra, o bien recurrirse a la generación de campos artificiales cuya mayor intensidad o mejor control podrá permitir generar registros más claros del terreno estudiado.

Existe una gran variedad de metodologías, que podemos clasificar según diversos criterios alternativos o la combinación de ellos. Por ejemplo, la naturaleza del campo (natural o artificial), el tipo de información obtenida (vertical o sondeo, lateral o calicata, en sección o tomografía, areal o mapa, volumétrico o 3D) y el tipo de campo (constante o continuo, variable o alterno).

Clasificación General de los Métodos Prospectivos

Campo Natural:	Potencial Espontáneo (PE) Corrientes Telúricas Corrientes Magnetotelúricas (MT)
Campo Artificial:	Campo Constante (CC): Líneas Equipotenciales (Inyección de Corriente) Sondeos Eléctricos Calicatas Eléctricas Tomografías Eléctricas y 3D
	Campo Variable (EM): Calicatas Electromagnéticas (ElectroMagnéticos) Sondeos de Frecuencia Tomografías EM y 3D Registros Hertzianos y Otros
	Polarización Inducida (PI): Dominio del Tiempo Dominio de la Frecuencia



PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Magnitudes Medibles

Son tres: permeabilidad magnética, constante dieléctrica y resistividad (o resistencia específica).

* La **Permeabilidad Magnética μ** es una magnitud fundamental en la prospección magnetométrica, como ya se ha visto en los Tema 4 y 5.

* La **Constante dieléctrica o Permitividad ϵ** es un ordenador lineal que vincula la magnitud de un campo eléctrico E con la inducción electrostática D. Su valor relativo depende de la composición química, la densidad y la estructura cristalográfica, porque influye mucho la dipolaridad (efecto pila) del material.

Matemáticamente: $D_i = \epsilon_j \cdot E_j$

(en el vacío ϵ vale 8,854 pF/m, en granitos y petróleo unos 20, y en agua y arcillas cerca de 80 pF/m)

Existen pocos métodos geoeléctricos basados en la valoración de la permitividad, de los cuales los más empleados son:

-El **Radar de Substrato o Georradar**, que ha sido aplicado habitualmente a objetivos de muy poca profundidad (pocos metros), con objetivos estratigráficos, hidrogeológicos o ambientales, y muy utilizado en áreas de suelos congelados (Tema 8).

-El **Perfil Dieléctrico de Pozos**, que en algunas cuencas ha sido muy empleado como indicador de porosidades y tipos de fluidos (Tema 8b).

* La **Resistividad ρ** es la magnitud eléctrica más contrastante y más utilizada en los métodos de la geoelectricidad. Las medidas de resistividad eléctrica del subsuelo son habituales en las prospecciones geofísicas. Su finalidad es detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo, sea que tengamos una fuente de campo natural o artificial.

Resistividad Eléctrica de los Suelos

La resistividad eléctrica ρ de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. Etimológicamente procede del latín *resistere* (*sistere* es mantenerse fijo, como insistir), así como su inversa, la conductividad σ , deriva de *conducere* (*ducere* es guiar, como *il Duce* Mussolini...) y esta última se puede definir como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica para atravesar el material.

La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo resulta determinada por la resistividad ρ del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la **resistencia eléctrica R** viene dada por: $R = \rho \cdot l / s$

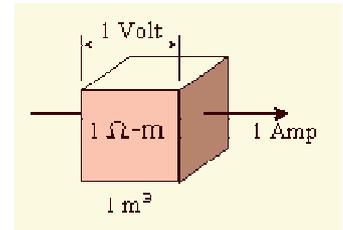
O bien, según la ley hallada por el alemán **Georg Ohm** en 1830: $I = V/R$

y por lo tanto $R = V/I$

por lo que $\rho \cdot l/s = V/I$ y $\rho = (V/I) \cdot (s/l)$

(s/l es la configuración geométrica del conductor, en este caso un cable)

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohmio por metro ($\Omega \cdot m$), ya que R se da en ohmios, y además I en amperios y V en voltios.



La **conductividad** σ es, como se dijo, el concepto inverso a la resistividad: $\sigma = 1/\rho$

La unidad de conductividad en el S.I. es el Siemens (S), por **Werner von Siemens**, alemán inventor de la dínamo hacia 1850, aunque suele referirse también como mho/m.

Tipos de Conductividad

Estrictamente hablando, todos los cuerpos son eléctricamente conductores dado que permiten, en mayor o menor medida, el paso de portadores de cargas eléctricas. Estos portadores pueden ser electrones o iones, hecho que permite distinguir entre dos tipos de conductividad: electrónica e iónica. Los cuerpos con conductividad electrónica se clasifican en metales y semiconductores. Los que tienen conductividad iónica pueden ser dieléctricos o electrolitos líquidos (mientras no devengan gaseosos).

▪ Conductividad Electrónica

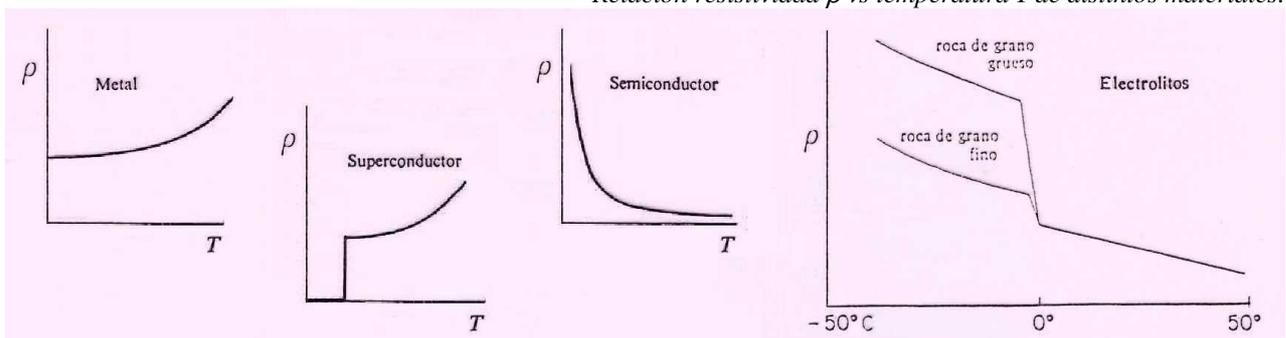
Metales: El mecanismo de la conductividad de éstos puede imaginarse como debido a que los electrones de valencia de sus átomos pueden moverse libremente entre la red cristalina que éstos forman, sin vinculación a ninguno determinado. La facilidad de movimiento de los electrones y su gran número redundan en una conductividad muy elevada. Su resistencia aumenta con la temperatura (mayor energía que desordena el movimiento electrónico y hace menos eficiente la conductividad) y con el contenido de impurezas. La resistividad de los metales a temperatura normal varía entre 10^{-8} y $10^{-7} \Omega \cdot m$. Son pocos y muy escasos los componentes de la corteza terrestre que poseen conductividad metálica. Entre ellos se cuentan los metales nativos (oro, plata, cobre, estaño) y quizá algún mineral poco abundante como la ullmanita (NiSbS).

(Como curiosidad, los materiales **superconductores**, que no se encuentran en la corteza terrestre, se comportan análogamente a los metales hasta que, a muy bajas temperaturas, caen a resistividad cero, como se esquematiza en la figura más abajo.)

Semiconductores: Son muchos y de gran importancia práctica. Su resistividad depende de su contenido en impurezas, a veces en grado extremo. Por añadidura su conductividad es función de la absorción de fotones, que producen saltos energéticos hacia la banda de conducción electrónica, y aumenta con la temperatura. Por ello, no cabe esperar que la resistividad de una especie mineralógica determinada pueda representarse por un dato único, sino que puede variar dentro de límites amplios.

En general los telurios y los arseniuros son conductores muy buenos. Los sulfuros a menudo clasifican también entre los conductores buenos, con excepciones como la blenda y el cinabrio. Los compuestos de antimonio y casi todos los óxidos suelen ser malos conductores, con la excepción de la magnetita. Ahora bien, estos minerales no se presentan en la naturaleza de forma individual, sino en asociaciones y junto con una ganga frecuentemente aislante (cuarzo, calcita, etc.), por lo que la resistividad conjunta de un filón puede variar mucho de unos casos a otros.

Relación resistividad ρ vs temperatura T de distintos materiales.



▪ Conductividad Iónica

Dieléctricos (o Aisladores): Los electrones están fuertemente ligados a los átomos. Esto puede deberse a que existen enlaces sea covalentes como iónicos. En este último caso la red cristalina forma un electrólito sólido. La mayoría de los minerales pertenecen a este grupo. A temperaturas normales las resistividades son muy altas, generalmente superiores a $10^7 \Omega\text{m}$. Son minerales dieléctricos el azufre, la blenda, la calcita, el cinabrio, el cuarzo y las micas, entre otros. Entre estos minerales, además, figuran los más importantes constituyentes de las rocas, las cuales se comportarían como aisladoras si no fuera por la presencia de electrolitos líquidos. También el hielo es aislador o resistor. Asimismo el petróleo.

Electrolitos Líquidos: sus condiciones de conductividad dependen del campo eléctrico aplicado, concentración de las soluciones, tamaño de los iones y temperatura (como se ve en la gráfica previa). En las rocas el agua contenida no se congela instantáneamente en virtud de que, a medida que baja la temperatura, la parte que va quedando no congelada es cada vez más salada –porque el agua que se congela es casi pura– y obvio que esto depende de la salinidad inicial del agua poral, pero también del tamaño de grano, porque cuanto más grueso, mayor es la proporción de espacio poral con electrolito. El agua pura es muy poco conductora a causa de su muy reducida disociación. La resistividad del agua destilada es de unos $10^5 \Omega\text{m}$, por lo que puede considerarse como aislante. Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan, sin embargo, conductividad apreciable, porque siempre tienen disuelta alguna sal, generalmente NaCl, variando entre 0,2 (agua de mar) y $10^3 \Omega\text{m}$ (agua dulce).

Comportamiento Eléctrico de las Rocas

La resistividad es una de las magnitudes físicas con mayor amplitud de variación para diversos materiales (figura en la siguiente página).

En las rocas se presenta un medio heterogéneo con por lo menos dos conductividades distintas, una de la matriz (dieléctrica, muy raramente semiconductor, según sea la mineralogía) y otra del espacio poral (electrolitos líquidos) donde los distintos parámetros de porosidad y permeabilidad importan. Pero también influyen dos parámetros físicos: presión y temperatura.

De modo que *la conductividad eléctrica depende de:*



Matriz mineral (composición, y estado de agregación)
Espacio Poral (volumen, configuración y fluidos)
Presión y Temperatura

Como se mencionó, el agua pura es muy poco conductora ($10^5 \Omega\text{m}$), pero las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan conductividad debido a las sales disueltas. Así, las aguas de lagos y arroyos de alta montaña varían entre $10^3 \Omega\text{m}$ y $3 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$, las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a $20 \Omega\text{m}$, y las aguas marinas tienen una resistividad de unos 0,2 Ωm .

En geoeléctrica el concepto de matriz incluye clastos, matriz (fina) y cemento. Si la resistividad de las rocas dependiese únicamente de los minerales constituyentes, habrían de considerarse como resistores en la inmensa mayoría de los casos, puesto que lo son prácticamente el cuarzo, los silicatos, la calcita, las sales, etc. Sólo en el caso de que la roca contuviese minerales semiconductores o metales en cantidad apreciable podría considerarse como conductora, es decir, sólo lo serían las menas metálicas, cuya interpretación es igualmente compleja porque normalmente están rodeados de una ganga aislante. Pero causalmente todas las rocas tienen poros en proporción mayor o menor, los cuales suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos líquidos, de lo que resulta que, en conjunto, las rocas se comportan como conductores iónicos, de resistividad muy variable según los casos. **La resistividad de las rocas puede variar en un margen amplísimo en función del contenido en agua, de la salinidad de ésta y del modo de distribución de los poros.** (Recordando que de su grado de interconexión depende la **permeabilidad**, que se mide en milidarcys, por las investigaciones del francés **Henry Darcy**, 1856.)

La resistividad de las rocas **también depende de la temperatura** a la que se encuentren, ya que ésta influye sobre la resistividad de los minerales (inversamente en metales que en semiconductores), pero además en los fluidos que hay en los poros. En las sedimentarias un descenso de la temperatura provoca un aumento de la resistividad y en el punto de congelación el agua pasa a ser un dieléctrico o mal conductor, tal como se grafica en la página anterior.

Asimismo hay influencia de la presión. En las rocas sedimentarias, o en general con conductividad iónica dominante, su incremento produce un incremento de resistividad por el efecto de la deshidratación consecuente. Pero si, en cambio, las rocas tienen abundancia de minerales con conductividad electrónica, el aumento de presión suele aumentar la conductividad total de la misma.

Por último, cabe mencionar que la resistividad de algunos minerales, y como consecuencia de las rocas que éstos forman, varía según la dirección de medida que se toma, es decir, que presentan **anisotropía eléctrica**. En las rocas sedimentarias la estratificación puede producir anisotropía, aunque en general este efecto es débil dada la aleatoriedad de las orientaciones de los minerales en las rocas.



“In tali ricerche, dobbiamo aver cura di tenere a mente la forza elettromotrice della Terra, e le correnti telluriche...”

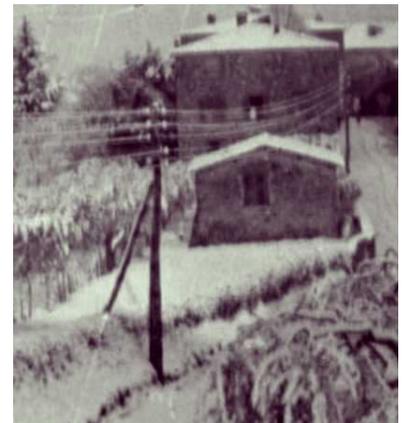
[“En tales investigaciones, debemos tener cuidado de tener en mente la potencia electromotriz de la Tierra, y las corrientes telúricas...”]

Carlo Matteucci (1844)



MÉTODOS GEOELÉCTRICOS DE CAMPO NATURAL

Carlo nació en 1811 en Forlì (Romagna, unos 200 km al noreste de Pisa), hijo de Chiara y Vincenzo (cirujano del hospital local). Tras el secundario superó los exámenes de ingreso en la cercana Università di Bologna, años en que por propia iniciativa estudió aspectos geológicos de los cercanos Apeninos. Ya graduado como físico, se fue a perfeccionar a la École Polytechnique de París, donde entabló amistad con grandes científicos, entre ellos **François Arago** (físico y astrónomo) y **Antoine Becquerel** (investigador de electroquímica aplicada y abuelo del descubridor de la radiactividad). Por ese tiempo Italia estaba dividida y le causó gran impacto la ejecución del patriota **Ciro Menotti** a manos de autoridades serviles al Imperio Austríaco. (Hoy existen jueces corruptos que procuran encarcelar políticos no serviles al Poder económico.) **Carlo Matteucci** llegó a tener a su cargo la cátedra de física de la Università di Pisa, realizó viajes académicos por Francia e Inglaterra y se casó con la escocesa **Robinia Young**. Hizo innumerables aportes a la física, especialmente a los fenómenos eléctricos, meteorología, inducción magnética, polarización de electrodos, instrumental médico y hasta electrofisiología animal (fue un torturador de ranitas..., como antes **Luigi Galvani**). De espíritu humanista y con visión federal, se involucró en política, fue senador por el Reino de Cerdeña y luego ministro de educación del presidente **Urbano Ratazzi** en el naciente Reino de Italia. Entre sus muchas publicaciones, están aquellas referidas a las corrientes que él bautizó como telúricas y que estudió a partir de medir (con electrodos impolarizables) su interferencia con las líneas telegráficas de Saint Maurice (Francia) y con las tendidas entre Pisa y la portuaria Livorno (primer telégrafo en la península, inicio de las comunicaciones a distancia) así como entre Milán y Monza, que solían tener correlato con la aparición de auroras boreales (auténticas señales del más allá). El bueno de Matteucci se estaba tomando unos días de descanso en Livorno cuando lo sorprendió la parca, a los cincuenta y siete años. Las ranitas festejaron.



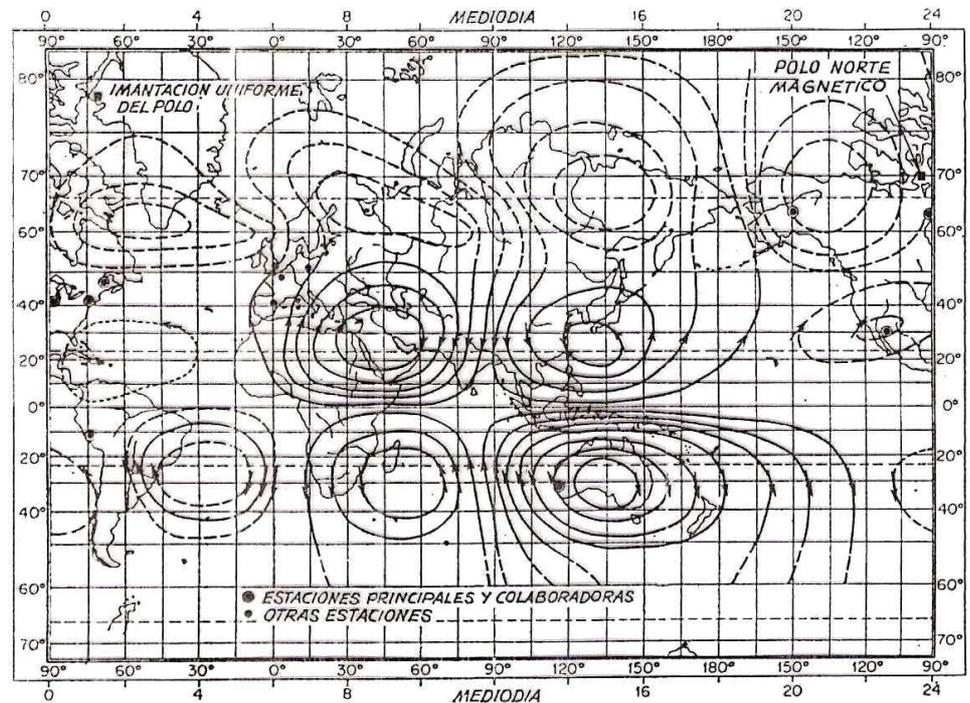
Antiguas líneas telegráficas en Italia.

CORRIENTES TELÚRICAS Y ATMOSFÉRICAS

Las corrientes eléctricas naturales que circulan por la corteza terrestre son llamadas telúricas y se originan por la inducción primaria (P) del campo geomagnético de la Tierra, más la interacción de las tormentas eléctricas troposféricas, que a su vez pueden interactuar con otras corrientes corticales menores. Dada la variabilidad del campo magnético externo, las corrientes telúricas inducidas o secundarias (S) se manifiestan con amplitud y frecuencia cambiantes a lo largo de las horas y también de un día a otro, registrando desde casi 0 hasta 10.000 Hz, habitualmente con amplitudes bajas.

A escala global, las corrientes telúricas conforman ocho circuitos eléctricos principales, cuatro en cada hemisferio, más otros circuitos menores distribuidos geográficamente, en especial en las regiones polares.

Respecto a la conexión entre la tierra y el aire, la superficie terrestre tiene carga negativa y atrae iones positivos de la atmósfera cuando hay buen tiempo. En cambio, durante las tormentas las cargas positivas viajan en sentido contrario. Las nubes en su base se cargan negativamente y estas cargas fluyen hacia tierra generando las descargas eléctricas (rayos). Y en forma análoga se dirigen hacia la parte superior de las nubes por hallarse positivamente cargada (se visualizan en forma de relámpagos).



Sistema de corrientes terrestres a las 6 horas de tiempo medio de Greenwich. (Chapman y Bartels, 1940, Cortesía de la Oxford University Press.)

REFUCILOS EXTRATERRESTRES

Todos los planetas y lunas con campo magnético propio naturalmente tienen corrientes eléctricas internas que son sus causales y que generan una magnetosfera que interactúa electromagnéticamente con el viento solar (o con la gran magnetosfera de Júpiter). Estamos refiriéndonos principalmente a Mercurio, la Tierra, los cuatro gigantes y la luna Ganimedes. Es muy presumible que por inducción éstos también posean equivalentes de las corrientes telúricas, con rangos de intensidades diferentes en cada caso.

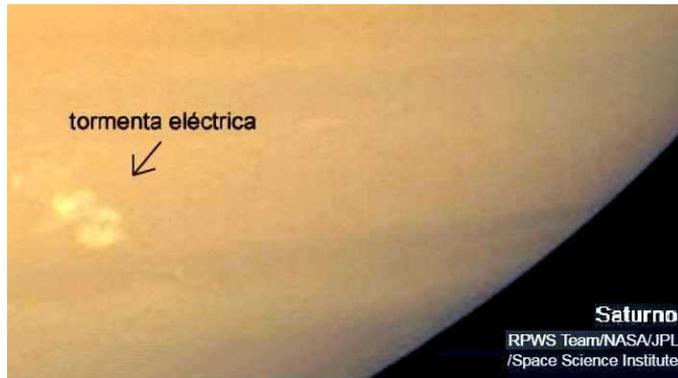
A nivel atmosférico, además de la inducción que puede dar el viento solar, suelen existir disparadores propios. Se estima que ocurren unos 50 relámpagos por segundo en la atmósfera terrestre. Y es probable que cada planeta o luna con atmósfera manifieste corrientes eléctricas asociadas a su dinámica.

En el caso de Venus, carente de un escudo magnético propio, la acción del viento solar induce corrientes eléctricas atmosféricas que producen el ya citado escape del hidrógeno y el oxígeno hacia el espacio. Además, el fenómeno de luces cenicientas (*ashen lights*) es un ligero brillo observado ocasionalmente en su lado nocturno que, sumado a la detección de emisiones de radio de baja frecuencia, sugiere que se producen descargas eléctricas en las nubes sulfurosas de las capas bajas de esa densa atmósfera.

En Marte también hay algunos signos de descargas eléctricas, que en este caso parecen ocurrir durante las intensas tormentas de polvo que suelen azotar el planeta rojo (y esculpir formas extrañas, como también sucede en la Patagonia, tal el caso de la enigmática efigie que con el tiempo se está modificando).

Los rayos también descargan en Júpiter, Saturno y probablemente Urano y Neptuno. En la tierra un huracán puede perdurar semanas, mientras que la Gran Mancha Roja de Júpiter ha existido durante más de 150 años y es una de tantas formaciones tormentosas alrededor de ese enorme planeta. También permanentemente una gran masa de átomos cargados es expulsada de la magnetosfera joviana con gran intensidad generando corrientes eléctricas que fluyen hacia algunos satélites, sobre todo Io y en menor medida Europa.

En Saturno es notable que la intensidad de ionización es unas 100 veces mayor en el lado iluminado que en el lado oscuro de su ionosfera. En ese planeta también han ido apareciendo enormes tormentas ciclónicas (en promedio una cada año terrestre) y han podido captarse las ondas de radio producidas por el aparato eléctrico asociado a cada una de ellas, con descargas hasta 10.000 veces más fuertes que las terrestres. Ocurren predominantemente a ciertas latitudes en las que se estima hay convección vertical a gran escala de nubes con agua en las capas altas de la atmósfera. También es posible que la luz solar directa favorezca



estos procesos. La mayor tormenta apareció en 2010, desarrollando un vórtice central oscuro de unos 5.000 kilómetros de ancho que persistió durante alrededor de 200 de nuestros días y se expandió hasta alcanzar un área donde hubiesen cabido varias Tierras.

Los gigantes de hielo, Urano y Neptuno, igualmente poseen formaciones tormentosas (y vientos feroces), pero sus descargas eléctricas atmosféricas todavía no han sido registradas, si bien los exometeorólogos las consideran muy probables.

Las lunas que poseen atmósfera son también potencialmente capaces de manifestar actividad eléctrica. Se ha confirmado la existencia de este tipo de actividad en Titán, el mayor satélite de Saturno, que además tiene ríos y grandes lagos de hidrocarburos y una atmósfera con 95% de nitrógeno y 5% de metano, como ya fuera mencionado en el Tema 1. Se forman nubes de metano, etano y otros compuestos orgánicos con movimientos convectivos, lo cual puede generar campos eléctricos estáticos y tormentas. Hay un ciclo de evaporación y lluvias de metano. (A lo que puede agregarse que la posibilidad de formación de moléculas orgánicas precursoras de la vida se estima mayor en atmósferas con tormentas eléctricas.)

MÉTODO DE LAS CORRIENTES TELÚRICAS

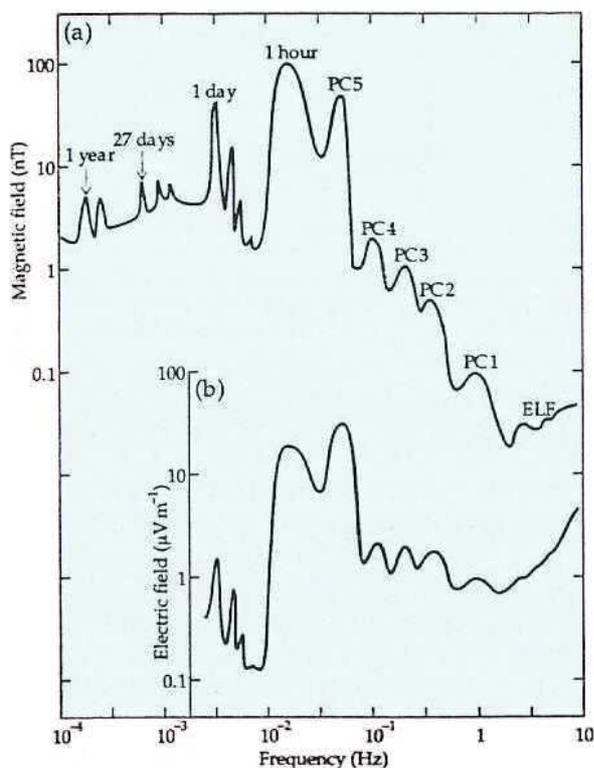
Parece ser que el inglés **Robert Fox** hacia 1832 fue el primero en inferir la existencia de las corrientes telúricas, pero éstas fueron cabalmente interpretadas por **Carlo Matteucci** entre 1847 y 1867, y recién en 1934 los alsacianos **Conrad y Marcel Schlumberger** propusieron en Francia el empleo de tales corrientes en la prospección geofísica. Inicialmente observaron que éstas aparecían como ruidos en los registros realizados a partir de las fuentes de corriente artificial (con las que ellos ya habían empezado a trabajar

algunos años antes). Idearon entonces probar el trabajo de adquisición de información geoeléctrica a partir de esta fuente natural; por lo cual lo que era ruido pasó a ser tomado como señal.

Como adelantamos, las corrientes telúricas son de baja amplitud y sus frecuencias son muy fluctuantes. La prospección con ellas puede complicarse en las ocasiones en las que existe una fuerte actividad magnética solar que afecta el campo terrestre. Porque durante las **tormentas magnéticas** las micropulsaciones del campo exterior de la Tierra (de muy baja frecuencia, inferiores a 0,1 Hz) pueden tener picos de amplitud de hasta 500 nT. Si es así, directamente **debe suspenderse la adquisición** de datos telúricos, tal cual ocurre en magnetometría. (Izquierda, correlación de espectros geomagnético y geoeléctrico.)

En el trabajo de campo la metodología consiste en **registrar con un par de electrodos móviles a cierta distancia mutua, midiendo la diferencia de potencial entre ellos**, y disponer de **otros dos pares de electrodos fijos** en la base de arranque, uno N-S y otro E-O, a fin de tener un control permanente de las fluctuaciones naturales de estas corrientes telúricas –más el aporte de corrientes originadas en la actividad humana– y no confundir las variaciones temporales con el cambio en los valores de un lugar del subsuelo respecto a otro.

Hace muchas décadas que este método casi no se utiliza porque fue superado por las variantes magnetotelúricas.



The frequency spectrum of natural variations in the horizontal intensity of the geomagnetic field, and (b) the corresponding spectrum of induced electric field fluctuations, computed for a model Earth with uniform resistivity $20 \Omega \text{ m}$ (after Serson, 1973). Peaks PC1–5 correspond to geomagnetic pulsations.

A la derecha, esquema general del método telúrico.

MÉTODOS DE LAS CORRIENTES MAGNETOTELÚRICAS

Estos métodos electromagnéticos (EM) de campo natural tienen algunas variantes que son muy parecidas a ciertas modalidades de los métodos EM de campo artificial.

El ruso **Andrei Tikhonov** en 1950 y el francés **Louis Cagniard** en 1953 elaboraron las bases del método magnetotelúrico (MT), que consiste en medir no sólo las componentes eléctricas del campo magnético, sino además sus contrapartes magnéticas –con sensores que pueden ser bobinas simples o magnetómetros– a fin de combinar las mediciones en conjuntos de datos más robustos, que por añadidura dan resultados menos afectados por las variaciones del campo externo.

De manera que *se miden las mismas corrientes telúricas* ($E_{x,y}$), *pero además sus correlativos vectores magnéticos* ($H_{x,y}$), que son ortogonales, como está dibujado a la derecha.

La impedancia es: $Z(\omega) = E_x(\omega) / H_y(\omega)$ O alternativamente: $Z(\omega) = E_y(\omega) / H_x(\omega)$ (E_x y E_y es el campo eléctrico medido en las direcciones perpendiculares x e y en función de la frecuencia angular ω , y análogamente H_x y H_y)

Para semiespacios homogéneos de resistividad ρ_0 se demuestra que: $Z_0(\omega) = \sqrt{i \cdot \omega \cdot \mu \cdot \rho_0}$ (donde $i = \sqrt{-1}$, Z_0 y ρ_0 caracterizan el semiespacio y μ es su permeabilidad magnética)

Desde allí se definen los parámetros a graficar: Resistividad $\rho_{ij} = (1/\omega \cdot \mu) \cdot |Z_{ij}|^2$
Fase $\Phi_{ij} = \arctan[\text{imag}(Z_{ij}) / \text{real}(Z_{ij})]$

La componente imaginaria es la desfasada $\pi/2$ ó 90° respecto a la real. Las **amplitudes o resistividades aparentes R** (ρ_{ij}) y las **fases P** (Φ_{ij}) *se miden en dos direcciones:*

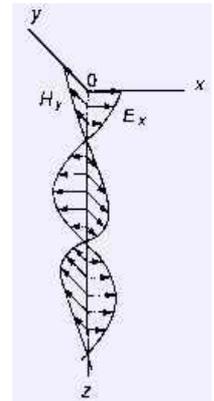
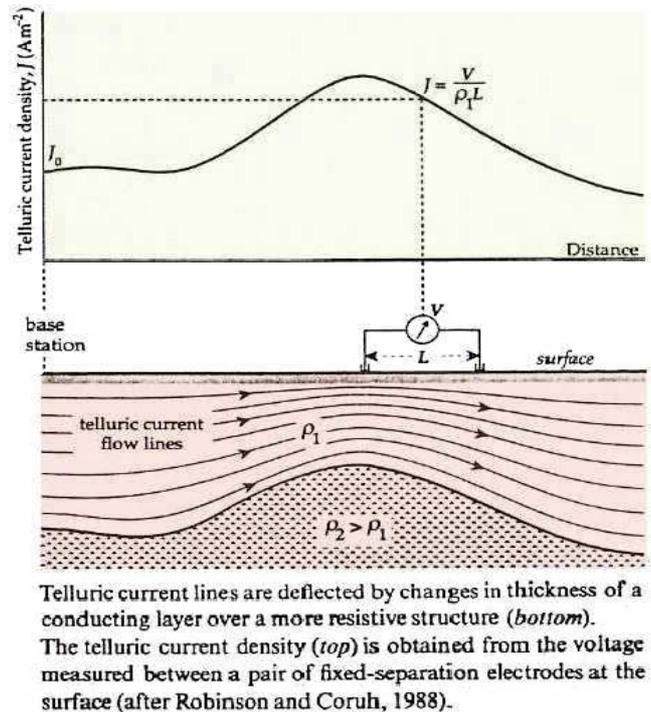
- *paralelamente al rumbo general de las formaciones* a mapear, obteniéndose los Telúricos Eléctricos (TE), es decir **resistividades RTE y fases PTE**
- *ortogonalmente al rumbo*, los telúricos magnéticos (TM), esto es, las **RTM y PTM**.

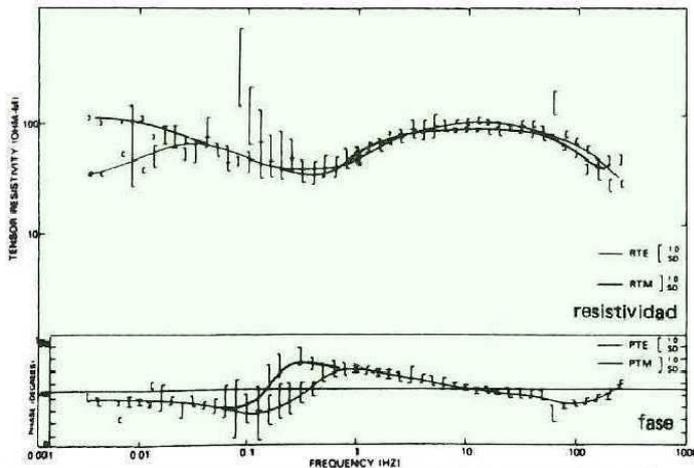
Las curvas RTE y RTM se grafican juntas y lo mismo las PTE y PTM. *Donde entre curvas que forman un par la separación es mayor, estamos ante conductividades de orientación preferencial (por diques, fallas, etc.) para el rango de frecuencias de tal separación* (primeras figuras de la página siguiente). *Frecuencias más bajas corresponden a lugares más profundos; y cuanto más altas son, de más arriba provienen.*

La profundidad de penetración z depende inversamente de μ , ω y la conductividad σ : $z = \sqrt{2 / \sigma \cdot \mu \cdot \omega}$

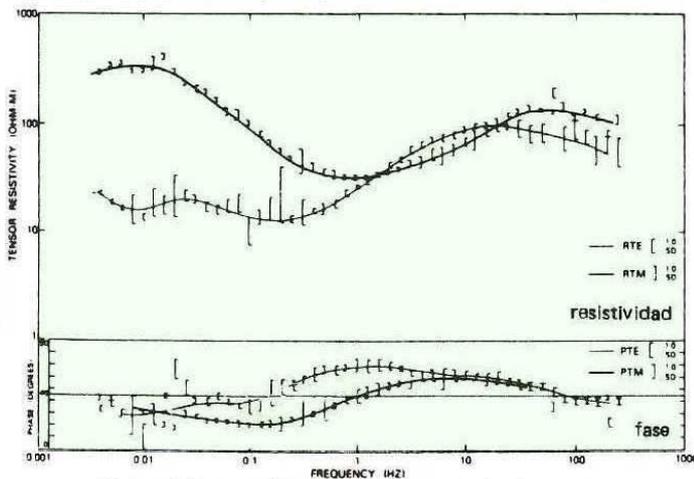
con $\omega = 2\pi \cdot f$ (siendo f la frecuencia), de donde empíricamente: $Z(m) = 503 \sqrt{\rho(\Omega m) / f(\text{Hz})}$

El caso de las figuras siguientes es de la cuenca de Paraná o Chacoparanaense en Brasil e ilustra el método, *generando modelos iterativos del subsuelo hasta lograr el mejor ajuste con los datos*. La cuenca geológica tiene cierta coincidencia con el área de distribución de las culturas tupí-guaraníes y naturalmente con la actual cuenca fluvial, último episodio de una larga historia que se inició con el evento de ruptura (*rift*, grieta) que precedió la apertura del Atlántico Sur. El abombamiento térmico bajo el supercontinente de Gondwana provocó gran cantidad de *rifts* y algunos fueron coalesciendo para formar una larga depresión que resultó progresivamente inundada por el mar (como hoy lo es el mar Rojo y todavía no lo es la zona de ruptura de África oriental, ocupada por lagos). Y fue surgiendo la dorsal centroatlántica que siguió sacando calor del manto. La biota sudamericana empezó a evolucionar con cierta independencia (aunque la gran extinción K-Tc no distinguió continentes) y los *rifts* abortados a ambos lados del Atlántico dieron origen a las cuencas por subsidencia térmica (desplome o *sag*) africanas y sudamericanas. Varias con sistemas petroleros, sobre todo en áreas de actual plataforma continental submarina, antes emergidas (caso del pre-sal en Brasil).



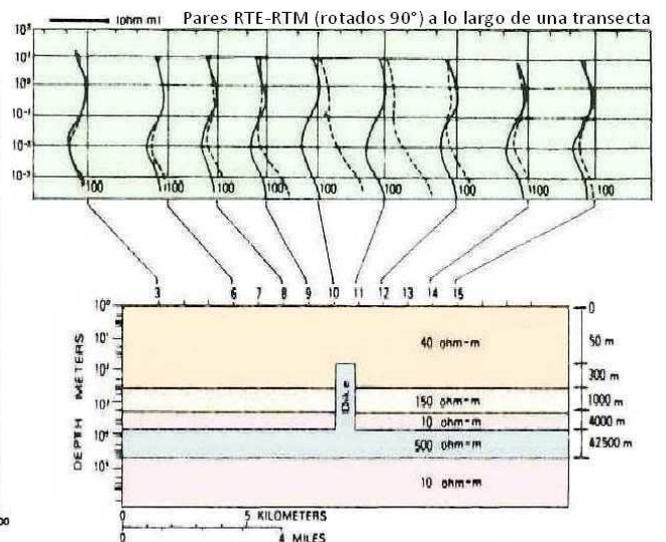


Sondeo de MT típico unidimensional (1-D) de la cuenca de Paraná. Las características 1-D exigen que los valores de resistividad (RTE y RTM) y fases (PTE y PTM) sean esencialmente idénticos.

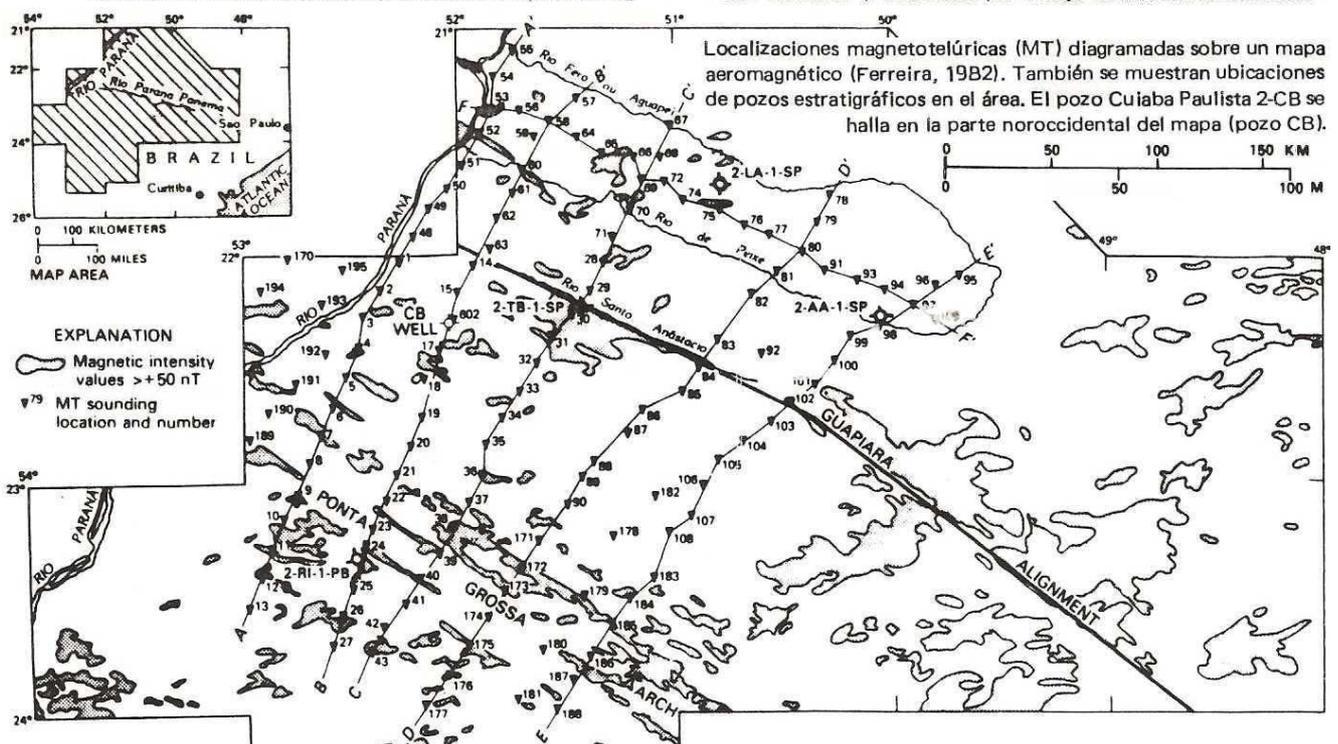


Datos típicos no 1-D, como lo evidencia la divergencia entre los valores de resistividad y las fases correspondientes.

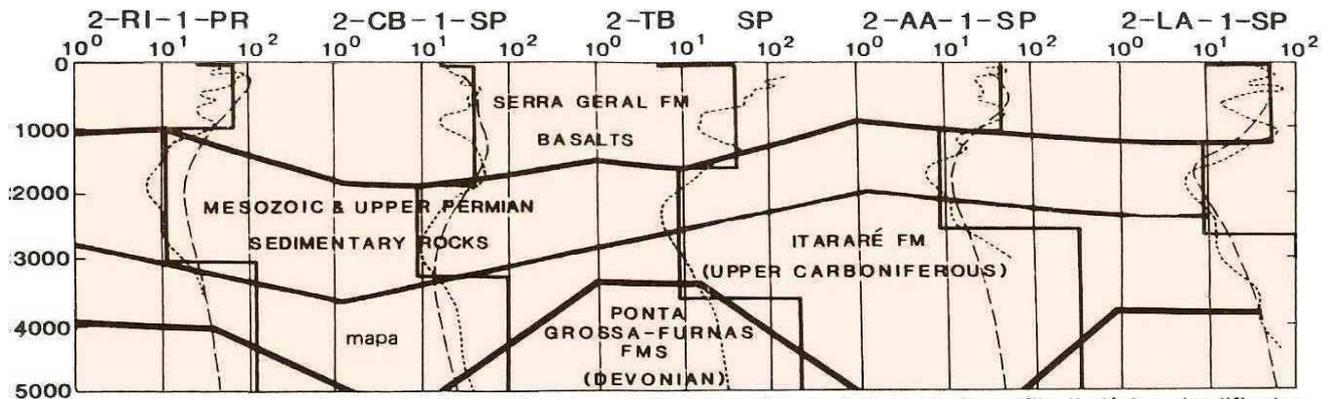
El objetivo en esta exploración fue la detección de diques ígneos, así como la determinación de los espesores sedimentarios y las estructuras geológicas –potenciales reservorios y trampas– por debajo de los más de mil metros de coladas basálticas superpuestas de la formación Serra Geral (el campo de lavas más extenso del mundo, abarcando áreas de Argentina, Paraguay, Brasil y Uruguay), que han sido majestuosamente esculpidas por el cincel fluido del río Iguazú (agua grande, en guaraní), que actúa como un espejo que impide una buena iluminación sísmica de las formaciones que yacen por debajo y podrían interesar a los petroleros.



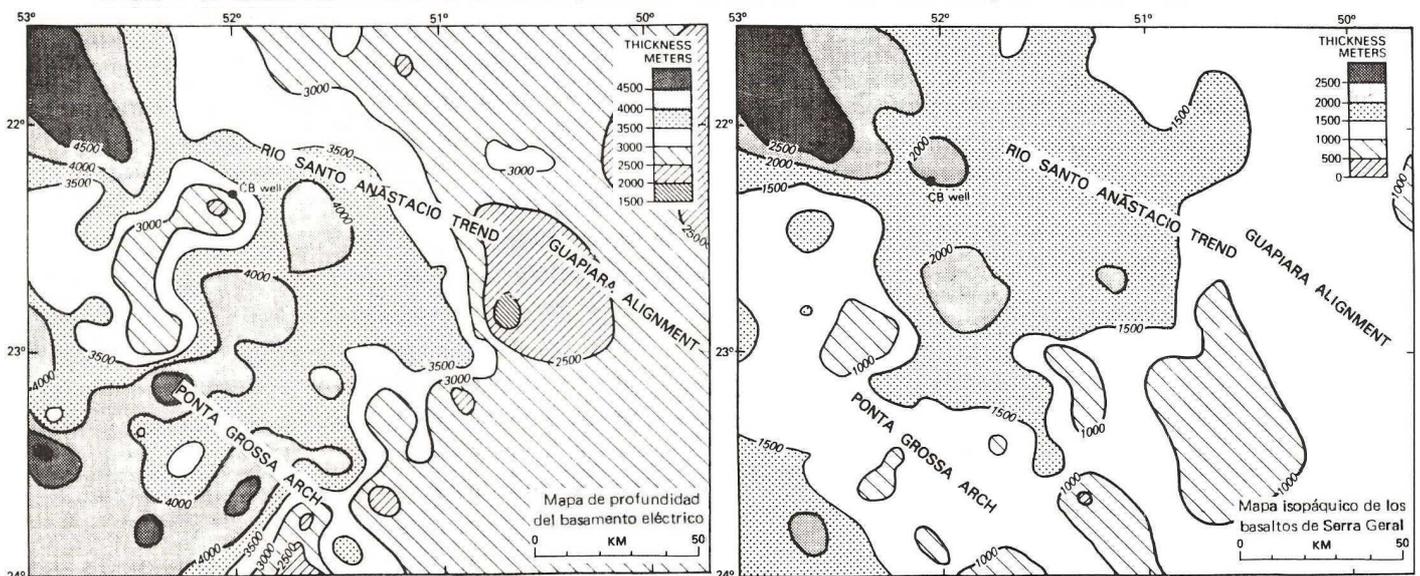
Modelo computarizado que simula un dique cortando sedimentos del Paleozoico y Mesozoico por debajo de una unidad basáltica.



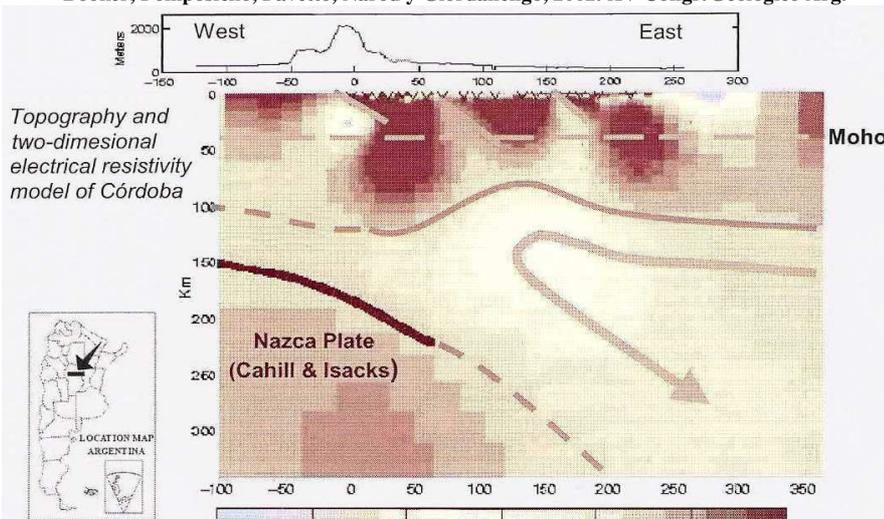
Localizaciones magnetotelúricas (MT) diagramadas sobre un mapa aeromagnético (Ferreira, 19B2). También se muestran ubicaciones de pozos estratigráficos en el área. El pozo Cuiaba Paulista 2-CB se halla en la parte noroccidental del mapa (pozo CB).



Cortes correspondientes a las cinco perforaciones indicadas en el mapa. Se exponen los perfiles litológicos simplificados de los pozos, así como el perfilaje de inducción eléctrica suavizado, la inversión continua profundidad-resistividad de las curvas de amplitud TE para los sondeos MT más cercanos y los cuatro modelos de estratos utilizados para construir las secciones.



Booker, Pomposiello, Favetto, Narod y Giordanengo, 2002. XV Congr. Geológico Arg.

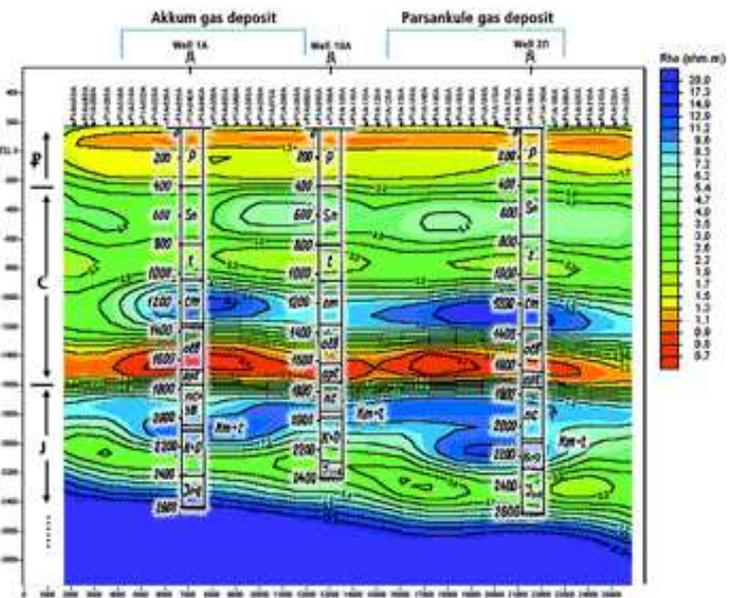
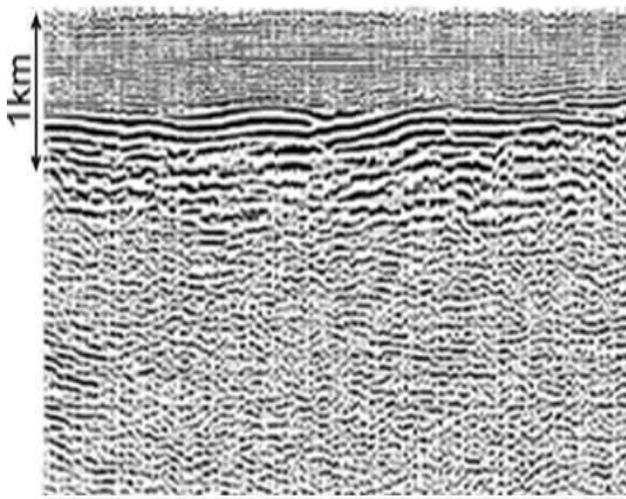


The MT sites are at the upside-down triangles. A tentative interpretation is sketched on top of the model. The heavy solid black line shows the position of the Benioff Zone from Cahill and Isacks (1992). It is extrapolated down-dip based on the resistivity. The lighter black line near 100 km depth is an approximate base of the South American lithosphere based on the resistivity model. The heavy pink arrow is a cartoon of the corner flow one might expect between the down-going slab and the overlying lithosphere. The eastward-dipping pink lines in the crust are known faults at the surface. They have been extended to the deep crust rather than becoming listric on the basis of the resistivity model.

A la izquierda otro ejemplo del método, en este caso para estudios corticales profundos en un área de las sierras Pampeanas de Córdoba. Se interpretan zonas conductivas a causa de los fluidos de alta temperatura bajo cada uno de los tres bloques de falla. En el sector oriental el máximo conductivo se debe al relleno sedimentario de esta parte de la cuenca Chacoparanaense. A pequeña escala, la detección de variaciones de resistividad habilita interpretar posibles cambios verticales en el grado de alteración de la roca, de la litología, la porosidad de las rocas reservorio y el grado de saturación, así como inferir las profundidades a las que existen

cambios de fase en los fluidos geotérmicos, ya que en contraste con los bajos valores de ρ provocados por el líquido caliente y mineralizado, las rocas saturadas con vapor presentan valores altos de resistividad.

Aquí una imagen de la adquisición MT en Uzbekistán (Paleorift Project, 2002) en un área que de 800 a 1.000 m de profundidad tiene una pantalla acústica para las reflexiones sísmicas (sección abajo), por lo cual es muy útil la información magnetotelúrica cuyo



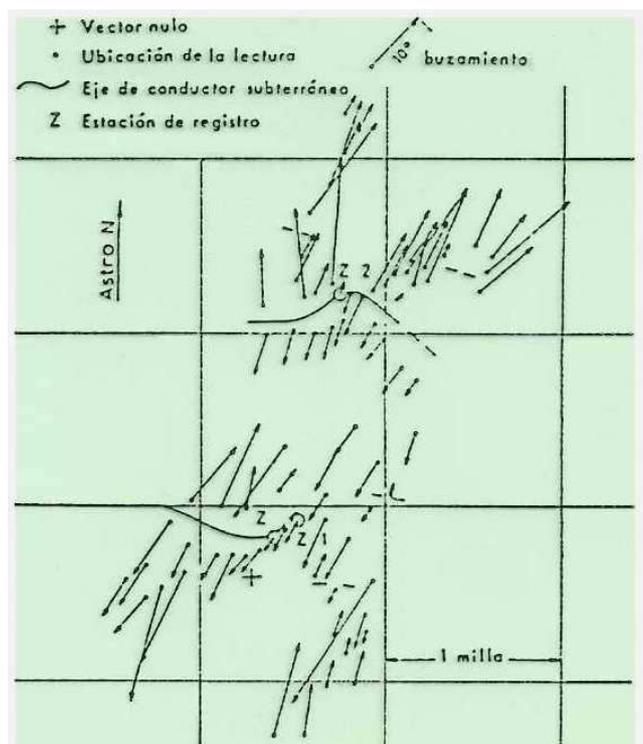
modelo ya resuelto (derecha) muestra capas de distinta resistividad y las de menor ρ correlacionan con reservorios petroleros comprobados en pozos.

Métodos Audio Magnetotelúricos

Son opciones del método MT que funcionan en el rango de las audiofrecuencias (generadas por tormentas eléctricas). Entre éstos, a su vez, existe la variante más convencional (AMT), que sigue un procedimiento de registro y cálculo análogo a lo ya descrito, y dos variantes especiales, a saber:

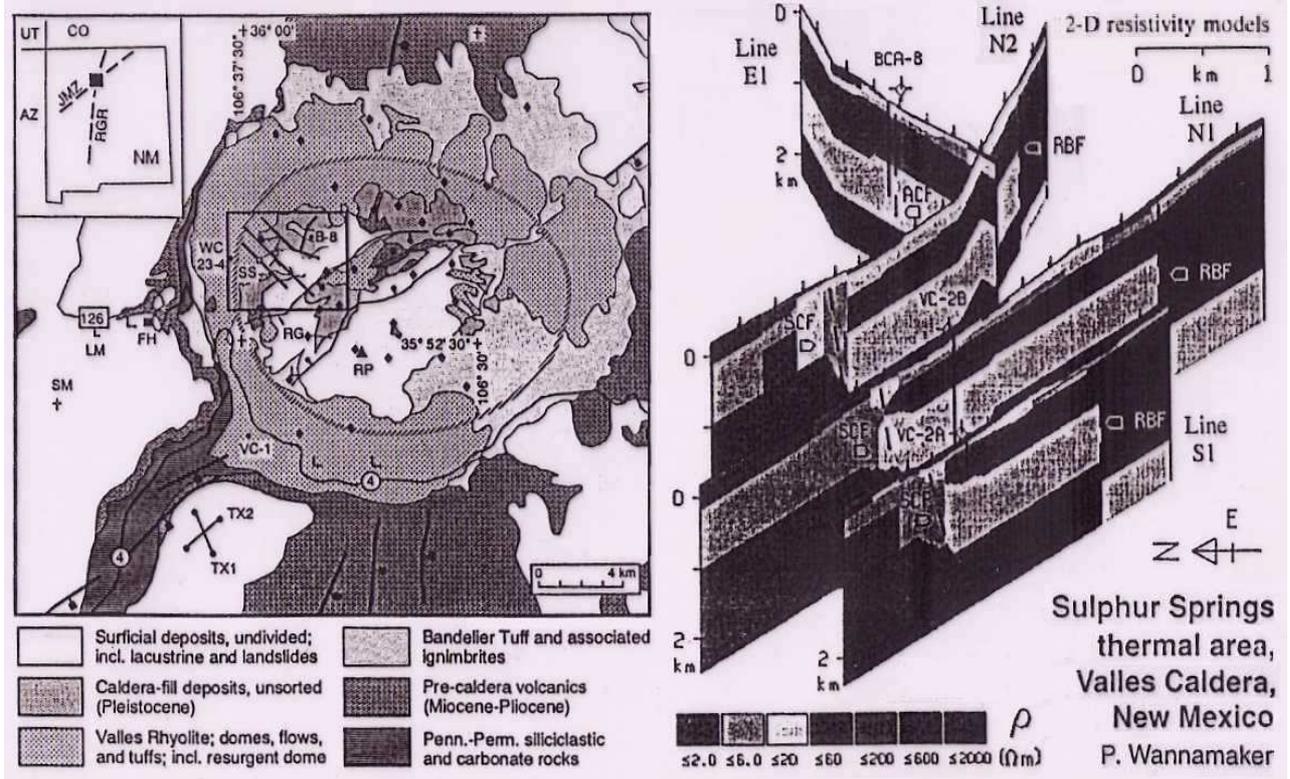
- Una es la denominada **Afmag** (Audiofrecuencias magnéticas, figura adyacente) y es útil para la localización de los cambios de buzamientos en estructuras someras del subsuelo. *Se registra de manera análoga a los métodos electromagnéticos de inclinación de campo* (veáse en el Tema 8), pero en este caso la fuente no es un campo artificial, sino uno natural (tormentas).

- La otra modalidad singular es la de **CSAMT** (Controlled Source A M T), que opera como la mayoría de los métodos MT, excepto porque la fuente es artificial y por lo tanto controlada, a partir de dos pares de antenas ortogonales emitiendo desde una distancia de varios km, tal como puede apreciarse en el ejemplo siguiente en



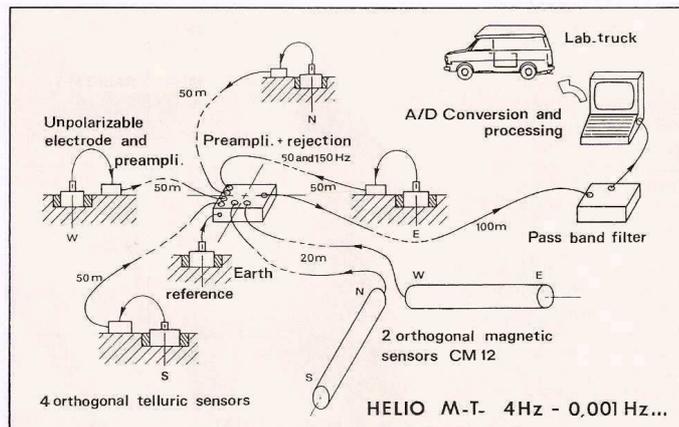
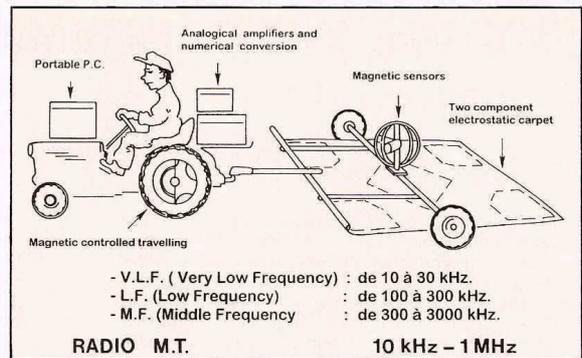
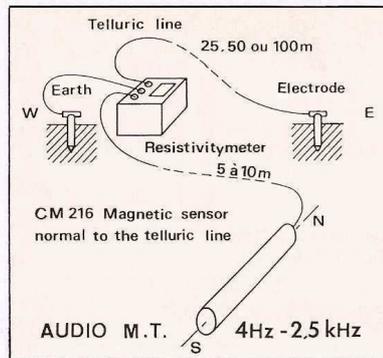
Ejemplo de vectores de Afmag (JEWELL y WARD, 1963)

un área geotermal volcánica en Estados Unidos. Se registró dentro del recuadro pequeño del mapa geológico (a la izquierda) y las secciones modeladas a partir de los datos muestran las zonas más resistivas, en las que mediante pozos se ha verificado la presencia de reservorios de vapor producible para generación eléctrica.



Otras Variantes del Método MT

También se puede trabajar dentro del espectro de las **Radiofrecuencias (RMT)**, en verdad aprovechando las emisiones radiales de origen artificial —una de cuyas opciones es el llamado **detector de metales** que se verá en el Tema 8—, y asimismo con **Heliofrecuencias (HMT)** dadas por la energía solar, tal como se resume en la figura a la derecha y en el cuadro de la página siguiente.



$$\rho = 0,2 T \left(\frac{E_x}{H_y} \right)^2$$

$$P = \frac{1000}{2\pi} \sqrt{10 \rho T}$$

- ρ = resistivity in Ωm
- T = period in s
- E = electric field in mV/km
- H = magnetic field in n.T.
- P = penetration depth in m

Versions	Main sources	Freq. Range	Penetr. Depth	Magn. Sensor	Tell. Sensor	Acquis. Time
RADIO M-T	Broadcast. systems	1MHz - 10KHz	1 - 50 m.	45 cm Ø loop	Capacitative on an electrostatic carpet (1-5 m.)	Instantaneous
AUDIO M-T	Atmospher. storms	2,5KHz - 8Hz	50 - 1000 m.	Flux feedback rod 1,15 m. long	Metallic or unpolarizable (15 - 100 m.)	30 mn.
HELIO M-T	Solar activity	8Hz - Diurnal	> 500 m.	Flux feedback rod 1,5 to 2 m. long or SQUID	Unpolarizable (100 - 1000 m.)	½ day to semi-permanent

Los métodos MT tienen aplicaciones muy diversas. Además de las ya vistas, *se los emplea para hallar mineralizaciones variadas (diamantes, rocas ígneas metalíferas, etc.), recursos hídricos, imágenes someras en áreas de alteración geoquímica por microfuga de hidrocarburos desde sus trampas, y otras.*

MÉTODO DEL POTENCIAL ESPONTÁNEO

Se miden pequeñas tensiones eléctricas naturales (menores a 1 voltio) producidas por diferencias en la actividad química de distintos sectores del terreno; no dependen de ninguna propiedad física definida. El fenómeno del potencial espontáneo (PE o SP, *self potential*) fue descubierto por el inglés **Robert Fox** en 1815 en minas de cobre –también indagó sobre temas de magnetismo y geotermia–, su investigación fue retomada en 1882 por **Carl Barus** en Nevada (Estados Unidos), pero comenzó a ser aplicado regularmente en prospección recién en 1913 por **Conrad Schlumberger** al realizar el primer hallazgo geofísico de un mineral no magnético: un yacimiento de sulfuros en Serbia.

Las investigaciones de **M. Sato** y **H. Mooney** publicadas en Estados Unidos en 1960 determinaron que el origen de los potenciales espontáneos puede remitir a diversas causas. *Nunca ocurren en suelos totalmente secos o helados.*

Tipos de Potenciales Espontáneos

Adquisición de PE

▪ de Fondo:

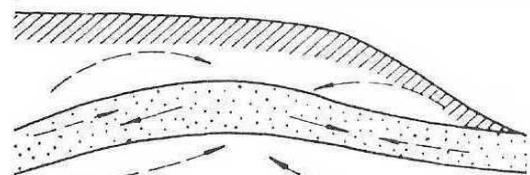
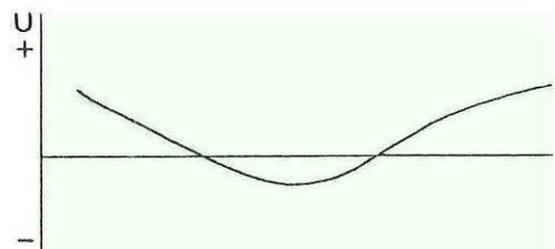
Vinculados sólo a conducción de tipo iónico pueden a su vez ser de dos tipos:

- **Potencial electroquímico o de difusión** por variaciones de concentración en los electrolitos del subsuelo (ácido húmico o salinidad).

- **Potencial electrocinético o de filtración o capilaridad** de los electrolitos que fluyen a través de los poros o membranas, sobre todo a niveles superficiales, como ejemplo el ascenso y descenso de la napa freática (véase la ilustración de la derecha), lo cual desplaza cargas eléctricas dado que se adsorben aniones en la superficie de los clastos y el fluido en movimiento se enriquece proporcionalmente en cationes.

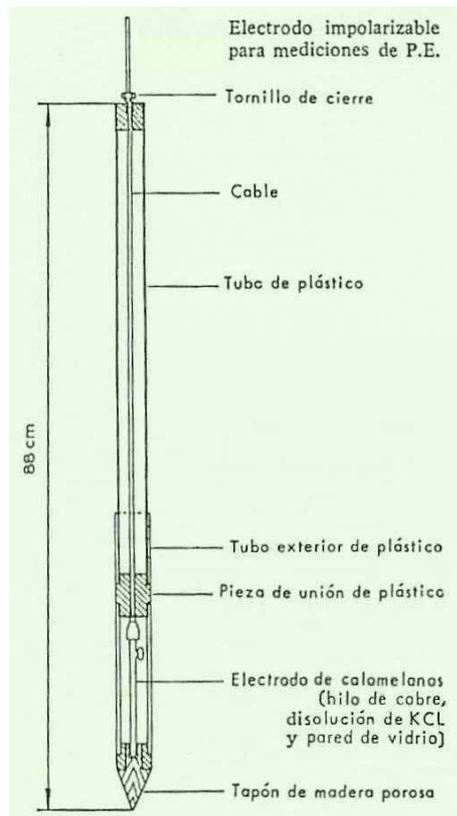
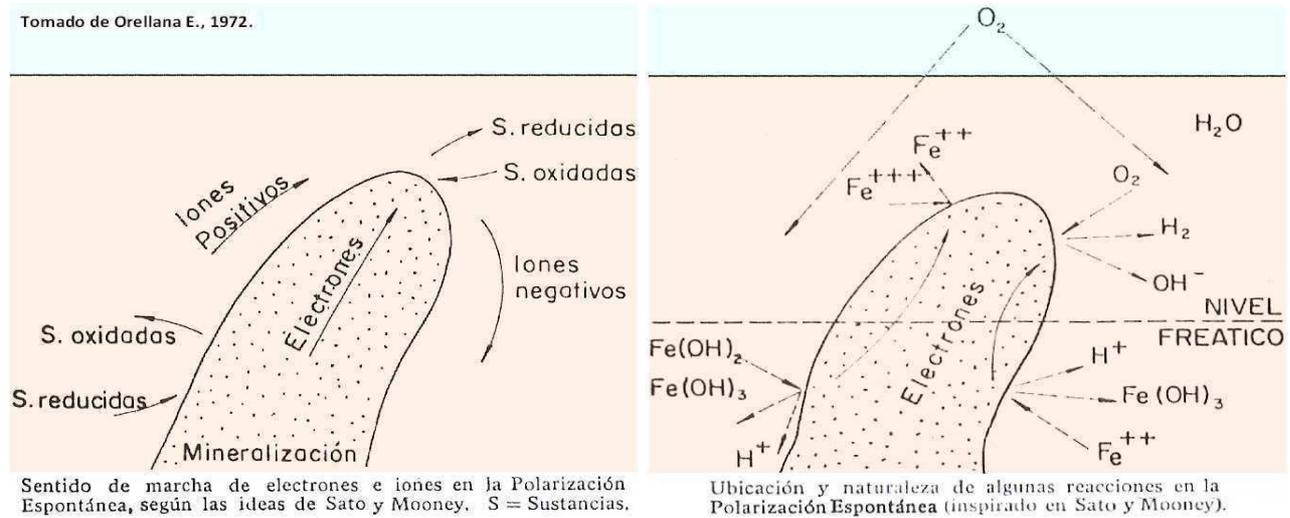
▪ de Mineralización:

Debido a las diferencias en la capacidad de oxidación de las aguas próximas al techo de los yacimientos que internamente poseen conductividad electrónica. O sea que hay un intercambio de cargas iónicas y electrónicas. La mineralización transporta electrones desde la parte inferior hacia la superior buscando el equilibrio electroquímico, por lo que esa parte alta se carga negativamente, generándose una pila, como puede verse esquematizado en las dos



Producción de potenciales de electrofiltración *per descensum*
flechas llenas: marcha del agua
flechas de trazos: líneas de corriente eléctrica
(inspirado en Yakuboskiy y Liakhov)

figuras siguientes. Ocurre típicamente en yacimientos de sulfuros, magnetita, grafito, etc.



Medición del Potencial Espontáneo en Superficie

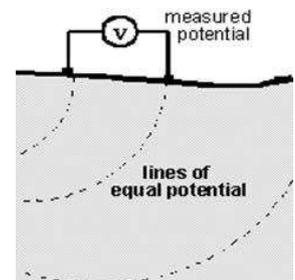
▪ Equipo necesario:

-Electrodos: deben ser impolarizables para evitar la acción electrolytica (acumulación de cargas en el contacto del metal, con conductividad electrónica, con el medio iónico del suelo) que enmascararía la diferencia de potencial natural. Se recurre al electrodo de Calomelanos (figura), o bien cobre o cinc sumergido en sulfato de cobre o cinc dentro de una cerámica porosa, u otras alternativas similares.

-Cable: con un buen recubrimiento aislante.

-Voltímetro: **de lectura directa**, con una impedancia de entrada alta, tipo electrónico de válvula (medidor de pH).

de compensación (oposición), basado en equilibrar la tensión entre los electrodos de SP con una tensión conocida.



▪ Trabajo de campo:

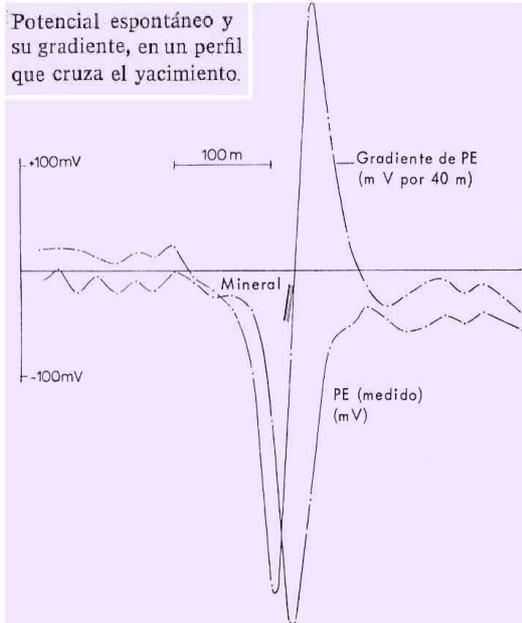
Existen dos modalidades alternativas.

a) Un electrodo permanece fijo en una estación base, mientras el otro es transportado a diferentes puntos. Se miden los potenciales eléctricos naturales. La presencia de valores negativos intensos sobre zonas amplias puede ser una indicación de interés prospectivo.

b) Los dos electrodos guardan una separación fija y son desplazados conjuntamente a lo largo del perfil de medición en pasos iguales a la separación mutua. Aquí lo que se mide son gradientes, que tienen la ventaja de un alcance operacional ilimitado. Cuando se miden gradientes, una lectura grande y positiva y otra grande y negativa separadas por un valor nulo resultan en una buena indicación.

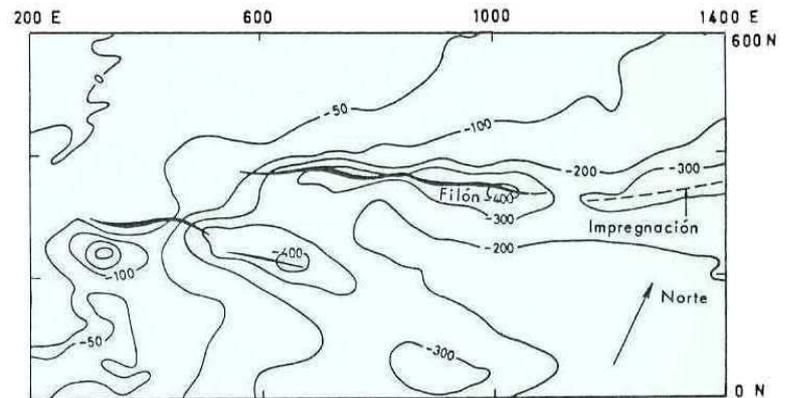
Aplicaciones

En la modalidad de prospección superficial el potencial espontáneo ha sido utilizado fundamentalmente para el cateo de mineralizaciones metalíferas), pero también, aunque con menor frecuencia, para estudios hidrogeológicos del subsuelo, evaluaciones medioambientales y, en tiempos más recientes, con el objetivo de

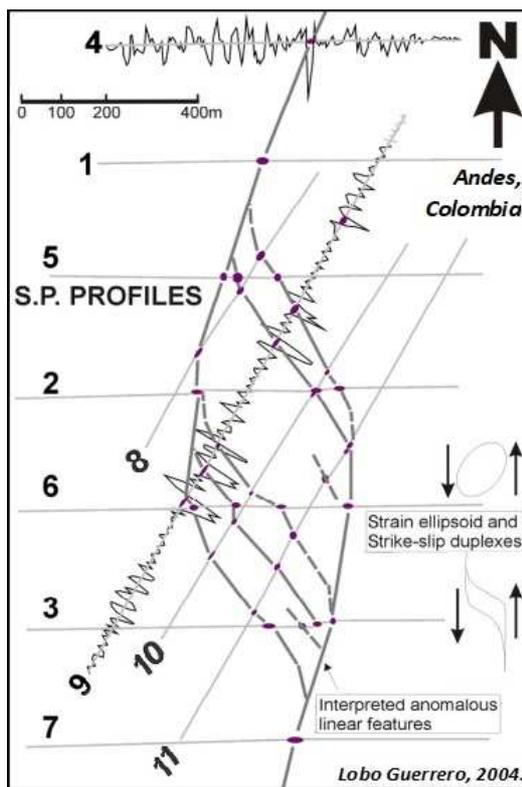


explorar yacimientos geotérmicos.

La profundidad máxima de investigación no suele superar los pocos cientos de metros, esto ya en condiciones muy favorables. **La mejor información se consigue dentro de las primeras decenas de metros bajo la superficie.**



Mapa del potencial espontáneo en el yacimiento de pirita de Kimheden, Norte de Suecia. Coordenadas de m; isolíneas en mV. (Cortesía de la BGAB.)

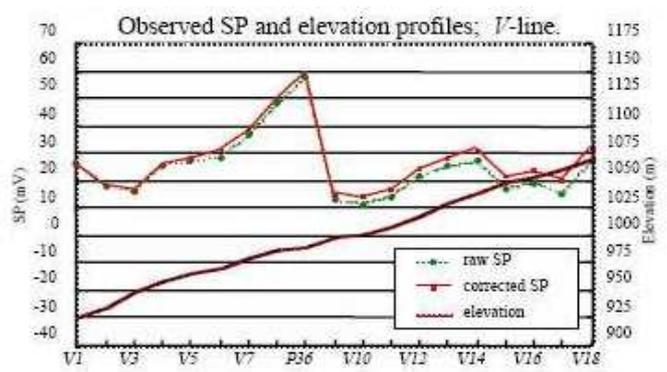
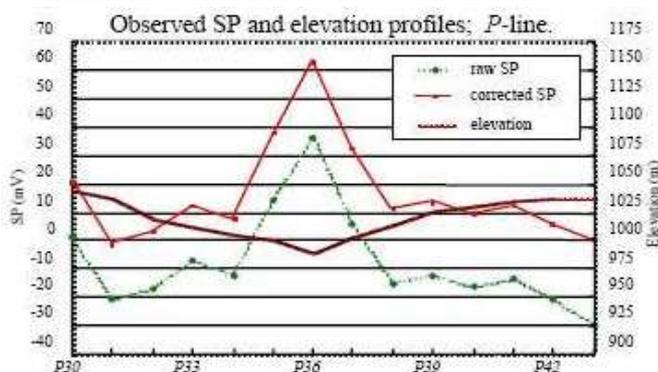


Arriba a la izquierda, perfil de PE de un yacimiento sueco de pirita, y a la derecha mapa de la zona con curvas de isovalores, más apretadas y alargadas donde hay mineralizaciones.

A la izquierda vemos un caso en los Andes de Colombia (país que lleva medio siglo flagelado por narcos y paramilitares), donde fueron registrados once perfiles de PE, de los cuales sólo dos están aquí graficados (4 y 9). En un contexto de estructuras dúplex causadas por esfuerzos transcurrentes, se han interpretado los rasgos lineales debidos a la presencia de venas enriquecidas en oro que se desarrollaron en sectores distensivos y que, por la presencia de sulfuros oxidados, causan una deflexión fuerte en los perfiles que las atraviesan (puntos color violeta).

Los dos cortes en la parte inferior de la página muestran la influencia de la corrección topográfica sobre los datos de PE crudos y cómo resulta su ajuste al corregir por cota. Fueron obtenidos para prospección geotérmica en la isla de Flores, Indonesia –donde los pequeños *Homo floresiensis* o *hobbits* de hace 70.000 años convivieron con elefantes enanos, ratas gigantes y dragones de Komodo–.

Veremos más adelante el registro y aplicaciones del PE (o SP) en pozos petroleros (Tema 06b).



CUESTIONARIO BÁSICO

- ¿Qué magnitudes eléctricas podemos medir en las rocas?
- ¿Cuáles son los distintos tipos de conductividad eléctrica?
- ¿Qué características de las rocas determinan sus propiedades eléctricas?
- ¿Cómo se clasifican los distintos métodos geoeléctricos?
- Expresar la ley de Ohm y definir resistividad aparente.
- Dar los fundamentos del método Telúrico.
- Explicar las curvas RTE-RTM y PTE-PTM.
- Referir las variantes del método MT y sus aplicaciones.
- ¿Qué posibles orígenes tienen los potenciales espontáneos?
- ¿Cómo se registran los potenciales espontáneos en superficie y qué aplicaciones podemos tener?

BIBLIOGRAFÍA DE REFERENCIA

- Booker, J., Pomposiello, C., Favetto, A., Narod, B. y Giordanengo, G., 2002. Electrical conductivity structure beneath Cordoba Province, Argentina. XV Congreso Geológico Argentino, Actas (p 313-316).
- Cantos Figuerola, J., 1972. Tratado de geofísica aplicada (p 379-387). Librería de Ciencia e Industria.
- Dobrin, M., 1976. Introduction to geophysical prospecting (p 568-574, 591-601). McGraw-Hill.
- Dupis, A., 1997. A third of a century of magnetotellurics. The Leading Edge V.16 N°5 (p 497-502).
- Francis, P., 1992. Exploration of the Solar System. En Understanding the Earth (p 3-24); Brown, G., Hawkesworth, C. y Wilson, C. editors. Cambridge University Press.
- Griffiths D. y King, R., 1972. Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos (p 19-84). Editorial Paraninfo.
- Herrero Ducloux, 1981. Memoria de los primeros 10 años de la unidad geofísica (86 p). INCyTH.
- Howell, B., 1962. Introducción a la geofísica (p 382-390). Ediciones Omega.
- Lowrie, W., 1997. Fundamentals of geophysics (p 203-212, 225-228). Cambridge University Press.
- Lunine, J., 1999. Evolution of a habitable world (p 30-32). Cambridge University Press.
- Lobo Guerrero, A., 2004. Application of spontaneous potential profiles for exploration of goldrich epithermal low sulphidation veins in a humid region, Andes Colombianos. Economic Geology, p. 1-5. Geoscience South Africa Conference.
- Parasnis, D., 1971. Geofísica minera (p 165-205). Editorial Paraninfo.
- Robinson, E. y Coruh, C., 1988. Basic exploration geophysics (p 487-490). John Wiley & Sons.
- Sheriff, R., 1991. Encyclopedic dictionary of exploration geophysics (376 p). Society of Exploration Geophysicists.
- Stanley, W., Saad, A. y Ohofugi, W., 1985. Regional magnetotelluric surveys in hydrocarbon exploration, Paraná Basin, Brazil. A.A.P.G. Bulletin V.69 N°3 (p 346-360).
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. y Keys, D., 1976. Applied geophysics (p 442-499). Cambridge University Press.
- Udías, A. y Mezcua, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 365-379). Alianza Editorial.
- Wallace, J. y Hobbs, P., 2006. Atmospheric science: an introduction survey (483 p). Elsevier Academic Press.
- Wannamaker, P., 1997. Tensor CSMAT survey over the Sulfur Springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, USA. Geophysics V.62 N°2 (451-465).
- Yasukawal, K., Andan, A., Kusuma, D. y Uchida, T., 2000. Self-Potential survey in the Mataloko geothermal prospect, Flores, Indonesia. Proceedings World Geothermal Congress (p 1985-1990).

Las figuras han sido tomadas y en muchos casos modificadas de los citados textos o en otros casos de Wikipedia, Petropedia u otras páginas de libre acceso en la Red.

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