

Geotecnia y Prospección Geofísica

Tema 8. Métodos de prospección geofísica generales



Jorge Cañizal Berini
Gema Fernández Maroto
Marina Miranda Manzanares

Departamento de Ciencia e Ingeniería del
Terreno y de los Materiales

Este tema se publica bajo Licencia:

[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



ÍNDICE

8.1. Introducción.

8.2. Método gravimétrico.

8.3. Métodos magnéticos.

8.4. Métodos radiométricos.

INTRODUCCIÓN

- La ciencia que estudia las propiedades físicas de la Tierra se denomina **Geofísica**.
- Los **métodos de prospección geofísica**, están basados en un conjunto de técnicas no destructivas que permiten estudiar el subsuelo hasta ciertas profundidades. Así, estos métodos estudian las variaciones y distribución en profundidad de las propiedades físicas de los materiales pétreos que componen la Tierra.
- Estos métodos se pueden aplicar en:
 - Geotécnia.
 - Investigación Minera.

INVESTIGACIÓN MINERA

- La **investigación minera o investigación de yacimientos**, es el paso previo y necesario a la apertura de toda explotación minera. Por **investigación minera** se entiende todos aquellos estudios y actividades tendentes a la localización, conocimiento y viabilidad de un “**cuerpo geológico**”.
- “**Cuerpo geológico**”: los yacimientos de minerales metálicos y no metálicos, así como las rocas industriales y ornamentales.
- **CUERPOS GEOLÓGICOS:**
 - Yacimientos de minerales metálicos.
 - Yacimientos de minerales no metálicos.
 - Rocas industriales y ornamentales.

INVESTIGACIÓN MINERA

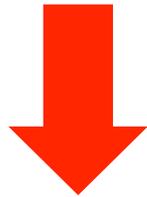
- De una manera general, la **investigación minera**, se dirige a buscar respuestas a las cuestiones siguientes (Azcárate, 1982):
 - Tipos de yacimientos minerales que puedan encontrarse en un territorio dado.
 - Cuantía y localización de los mismos.
 - Composición y formas de yacer de cada uno de ellos.
 - Modo apropiado para la explotación minera.
 - Proceso idóneo para la concentración mineralúrgica de las menas extraídas.
 - Procedimiento industrial para aprovechamiento de las primeras materias producidas.

ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN MINERA

- 1. Preexploración:** realizada sobre una zona de gran extensión, pretende determinar si las posibilidades de existencia de un yacimiento mineral. Para ello, **se recopila la mayor cantidad de información** disponible sobre la zona: **información bibliográfica, geológica, obtención de mapas geológicos y topográficos, fotos aéreas, imágenes de satélite, etc...**
- 2. Exploración e Investigación:** se lleva a cabo sobre áreas seleccionadas de la etapa anterior, con el objetivo de encontrar el yacimiento y características del mismo.
- 3. Evaluación:** con los datos obtenidos de la etapa anterior, se hace una valoración económica del yacimiento y un estudio de viabilidad.

LEY DE MINAS

- **Permiso de Exploración:** 1 año, técnicas que no alteren sustancialmente el terreno.
- **Permiso de Investigación:** 3 años, estudios para definir uno o varios recursos, demostrar que pueden ser aprovechados racionalmente → **Concesión de Explotación.**



- Nunca más de tres años, prorrogables otros tres.
- Diferencias con el Permiso de Exploración:
 - Duración.
 - Aplicación de las técnicas y métodos de estudio.

INVESTIGACIÓN MINERA

- Consiste en una **toma de datos continua** que debe ser interpretada según se desarrollan los trabajos
 - La investigación continuará o será interrumpida en **función de los resultados** obtenidos en cada etapa.
 - Cada etapa debe ir encaminada a comprobar los datos obtenidos y a **incrementarlos**.
 - **Métodos:**
 - **Métodos Indirectos**
 - **Métodos Directos.**
- **Prospección Geofísica.**
 - **Prospección Geoquímica.**

INVESTIGACIÓN MINERA

- Consiste en una **toma de datos continua** que debe ser interpretada según se desarrollan los trabajos
 - La investigación continuará o será interrumpida en **función de los resultados** obtenidos en cada etapa.
 - Cada etapa debe ir encaminada a comprobar los datos obtenidos y a **incrementarlos**.
 - **Métodos:**
 - **Métodos Indirectos**
 - **Métodos Directos.**
- **Prospección Geofísica.**
 - **Prospección Geoquímica.**

PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- La **prospección geofísica**, se realiza a través de los métodos geofísicos.
- Estos métodos aplican **técnicas** capaces de medir las variaciones de las propiedades físicas de los materiales que se encuentran en la corteza terrestre, permitiendo, por su comportamiento, la diferenciación de litologías o la existencia de yacimientos minerales.
- Especialmente, estos métodos contribuyen con su información a completar la geología de la zona de estudio.
- La información se obtiene mediante la utilización de **instrumentos específicos**, situados en el campo y capaces de medir las variaciones de los parámetros físicos.
- Estos métodos, permiten **obtener datos a distancia**, sin tomar contacto con los materiales del subsuelo. **Son métodos indirectos.**
- Los métodos pueden ser empleados desde escalas provinciales a sondeos.

LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

- La prospección geofísica consiste en determinar y estudiar las variaciones de una propiedad física en el terreno.
- Las propiedades que se estudian son: **conductividad eléctrica, densidad, magnetismo, transmisividad de ondas sísmicas, radioactividad.**
- El contraste entre una mineralización y su roca encajante genera una divergencia en el valor de la propiedad estudiada entre el valor esperado y el real encontrado. Es lo que se denomina **Anomalía geofísica.**
- Los **métodos geofísicos** permiten caracterizar las condiciones del subsuelo sin perturbarlo.
- Son métodos de coste bajo y de información alta. Pero suele ser necesario utilizar **más de un método** para lograr obtener la información deseada.

LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS PUEDEN SER APLICADOS EN

- Hidrogeología:

- Los métodos geofísicos pueden ser aplicados en la investigación hidrogeológica. En este caso, permiten determinar la **geometría de los acuíferos**, dado su **bajo coste y rapidez**, con relación al de los sondeos mecánicos.

- Minería:

- Los métodos geofísicos se utilizan en la **exploración minera**, tanto en la **cartografía geológica** como en la identificación de **zonas con posibilidades de mineralizaciones**.
- Durante la **explotación** de los recursos minerales, la geofísica se utiliza tanto en la delimitación como en la **evaluación del depósito**, y en los procesos de ingeniería dirigidos al acceso y extracción del mineral.
- Las propiedades en las que se basan estos métodos son adquiridas por las mineralizaciones durante su formación (Modelos genéticos).

LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

- **Geotecnia:**

- Permiten:

- Reconocimiento del terreno: obteniendo información de la estructura del subsuelo; determinando la deformabilidad de los materiales; hallando la profundidad del nivel freático y del sustrato rocoso.
 - Localización de cavidades y fracturas (naturales o artificiales): evaluación del grado de eficacia de tratamientos en la mejora del terreno.
 - Determinación de daños en estructuras existentes: caso de filtraciones en presas; estado del terreno bajo losas de hormigón; localización de estructuras enterradas.

LOS MÉTODOS GEOFÍSICOS

- La ventaja de la aplicación de un método de prospección geofísica, consiste, principalmente, en su gran aporte de información a bajo coste y en, relativamente, poco tiempo.
- Sin embargo, para poder aplicar un **método geofísico** en una prospección, es necesario que se presente dos condiciones importantes:
 - Que existan contrastes significativos, **anomalías** que se pueden detectar y medir.
 - Que estos contrastes se puedan **correlacionar** con la geología del subsuelo.

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS PROPIEDADES FÍSICAS

- Los métodos geofísicos se dividen en **métodos pasivos y métodos activos**, según las propiedades físicas.
- **MÉTODOS PASIVOS**: en estos métodos se miden las variaciones de una propiedad natural sin introducción de fuentes de energía externas.
 - Para ello se utiliza **un instrumento**, que mide la respuesta de la geología local a la energía natural.
 - Son PASIVOS:
 - Los métodos de prospección graviméticos.
 - Los métodos de prospección magnéticos.
 - Los métodos de prospección radiométricos.
 - Los métodos de prospección eléctricos de potencial espontáneo.

CLASIFICACIÓN SEGÚN LAS PROPIEDADES FÍSICAS

- **MÉTODOS ACTIVOS**: en estos hay que introducir en el terreno alguna forma de energía.
- La respuesta del terreno a la introducción de esta energía, se mide con un detector.
- Estos métodos son más complicados y caros, ya que se necesita un transmisor y un receptor. Por otra parte, tienen la ventaja de que **la transmisión de energía al terreno puede ser controlada** proporcionando respuestas con una información más particular de la zona, lo que permite mediciones más precisas.
- Son métodos activos: **métodos sísmicos y métodos eléctricos (con excepción del potencial espontáneo)**.

RECONOCIMIENTO AÉREO Y TERRESTRE

• La prospección geofísica tiene dos modalidades:

- La “*geofísica aerotransportada*”, en la que los aparatos se colocan dentro de un avión/dron y se miden los parámetros a la misma velocidad del avión
- La “*geofísica terrestre*”, en la que las mediciones se realizan en el suelo, con aparatos fijos o móviles.
- La rapidez de la geofísica aerotransportada resulta muy eficaz en las primeras etapas de la prospección.



RECONOCIMIENTO AÉREO Y TERRESTRE

- La aplicación de los métodos de prospección geofísicos aereotransportados presenta una gran ventaja sobre los métodos terrestres: gran **rapidez en la adquisición de datos y completa cobertura de la investigación, por lo que se usa frecuentemente en la fase inicial de la exploración.**
- La **precisión alcanzada en la actualidad por estos métodos, hace que pueda utilizarse en otras fases más avanzadas de la investigación.**
- Los métodos terrestres ofrecen **la mayor resolución en el reconocimiento del subsuelo, por lo que son usados para la prospección a pequeña escala.**

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- **Método gravimétrico**: este método mide las variaciones de la componente vertical del campo gravífico terrestre.
- **Métodos magnéticos**: basado en las variaciones del campo magnético de la Tierra, producidas por los componentes magnéticos de las rocas.
- **Métodos sísmicos**: basados en las variaciones en las propiedades elásticas de las rocas, medidas a través del comportamiento que presentan las ondas sísmicas que las atraviesan.

MÉTODOS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

- **Métodos radiactivos**: variaciones en la radiactividad natural, a partir del cual el contenido de elemento radiactivo de las rocas puede ser estimado.
- **Métodos eléctricos**: basados en las propiedades eléctricas de las rocas y los minerales, como la conductividad eléctrica, o su contrario la resistividad, que pueden ser obtenidas midiendo las diferencias de potencial eléctrico de las rocas.
- **Métodos electromagnéticos**: basados en la generación de un campo electromagnético primario que produce corrientes en los materiales conductores dando lugar a un campo electromagnético secundario.

MÉTODOS GEOFÍSICOS

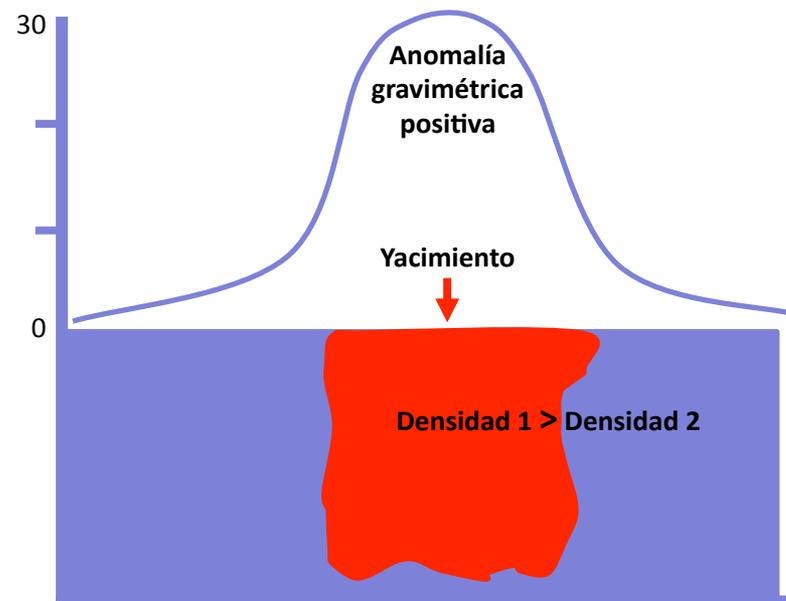
MÉTODO	PARÁMETRO A MEDIR	PROPIEDAD DEL MEDIO	ÁREA DE APLICACIÓN
Gravimétrico	Anomalías del campo gravitatorio.	Densidad.	Petróleo, arena-grava, aguas subterráneas y obras civiles.
Magnético	Anomalías del campo magnético.	Permeabilidad magnética y magnetización residual.	Petróleo, minería y obras civiles.
Sísmico	Tiempo de propagación de ondas sísmicas.	Densidad y módulos elásticos.	Petróleo, arena-grava, agua subterránea.
Eléctrico Resistividad Polarización inducida	Resistividad Susceptibilidad a la polarización.	Conductividad eléctrica. Capacidad eléctrica.	Minería, arena-grava, aguas subterráneas y obras civiles. Minería.
Autopotencial	Potenciales eléctricos naturales.	Conductividad eléctrica.	Obras civiles.

MÉTODO GRAVIMÉTRICO



MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- Se basa en la medida, en superficie, de las **pequeñas variaciones** (o **anomalías**) de la componente vertical del campo gravífico terrestre.
- Estas variaciones son debidas a una **distribución irregular** en profundidad de masas de diferentes densidades.

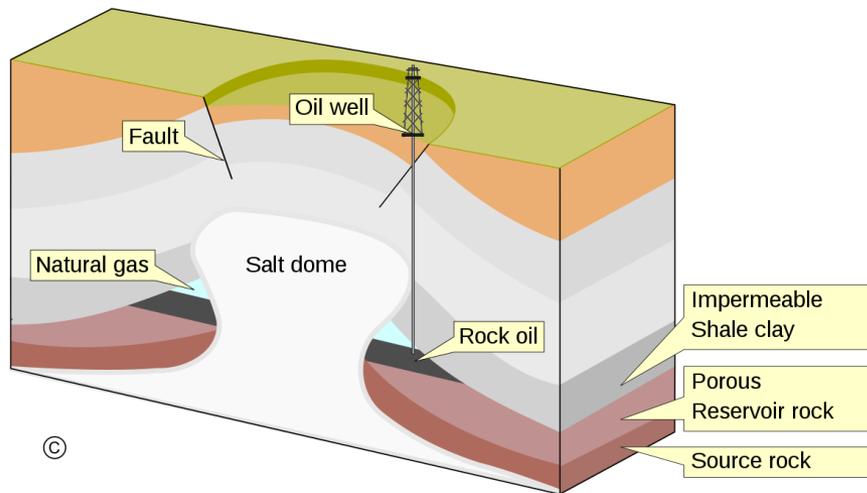


MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- Los altos estructurales como los **anticlinales**, harán aumentar localmente la fuerza de la gravedad en sus proximidades.



- Los **domos de sal**, de densidad baja, la disminuirán.



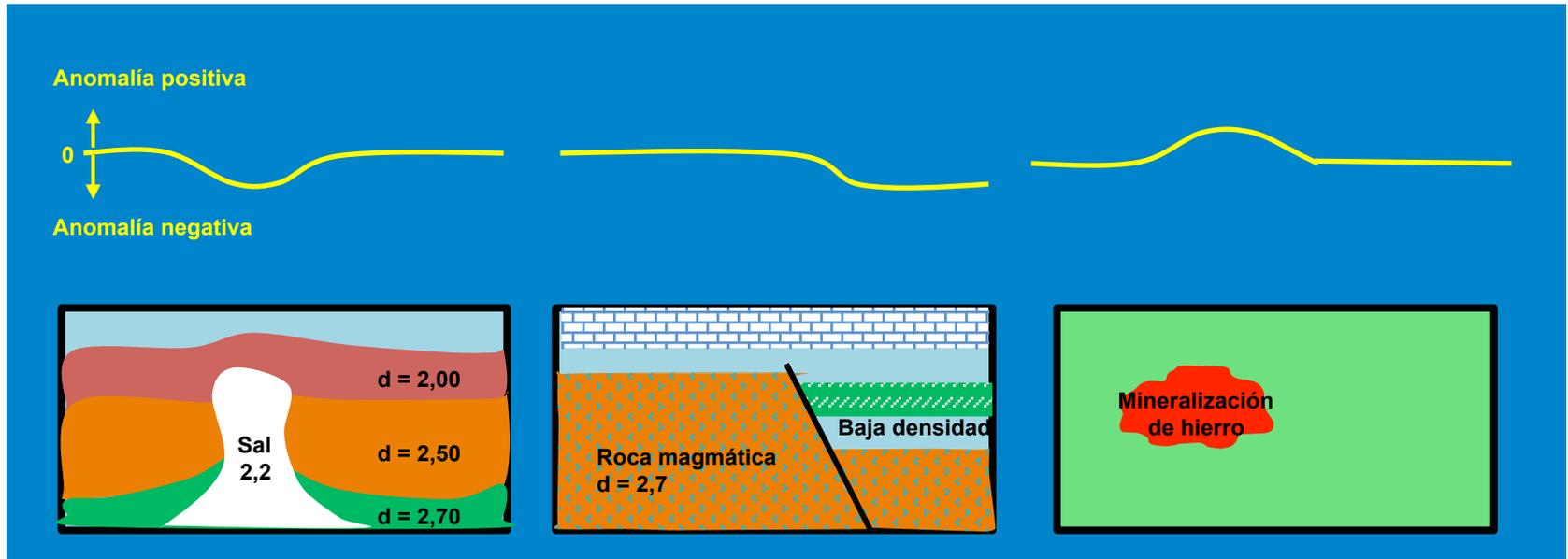
MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- Los **yacimientos minerales**, con densidad alta, harán aumentar localmente el valor de la gravedad.



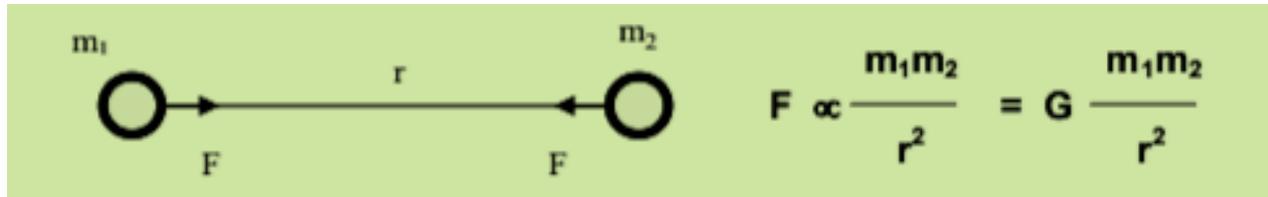
- El método gravimétrico fue aplicado inicialmente en la **prospección petrolífera en los Estados Unidos y en el golfo de México** con el objetivo de localizar **domos de sales**, que potencialmente albergan petróleo. Luego se buscaron estructuras anticlinales.

ANOMALÍAS



FUNDAMENTO

- El **Método de prospección gravimétrico**, se basa en las siguientes leyes:
 - La **Primera Ley de Newton** establece que existe una fuerza de atracción entre dos masas m_1 y m_2 separadas por una distancia r , representada por la siguiente relación de proporcionalidad.



- Para la determinación del factor de proporcionalidad, Cavendish, en el año 1798, definió la Constante de Gravitación Universal (G), que vale $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$.

FUNDAMENTO

- Si suponemos que la tierra es esférica e irrotacional con masa M , la atracción Newtoniana a una masa genérica m sobre su superficie será:

$$F = GmM/R^2$$

donde R es el radio medio de la Tierra.

- La segunda ley de Newton establece que *“la fuerza que actúa sobre un cuerpo es directamente proporcional a su aceleración”*: $F = m.a$.
- Entonces definimos como g a la aceleración de la gravedad, causada por la atracción de la masa de la tierra:

$$F = m.g = G.m.M/R^2$$



$$g = G \frac{M}{R^2}$$

UNIDADES

- El valor de g en el Sistema Internacional vendría dado en m/seg^2 , pero en honor a Galileo se definió el Gal = $1\text{cm}/\text{seg}^2$.
- El valor de g , que es la magnitud física generalmente utilizada para medir la gravedad, se expresa en gal o galio (cm/s^2). La gravedad media de la Tierra ($9,81\text{m}/\text{s}^2$) corresponde a 981 gal.
- Se necesitan valores tan pequeños como el miligal = 1 mgal = 0,001 Gal o la unidad gravimétrica $\text{ug} = 0,1$ mgal.
- Para trabajos de microgravimetría se utiliza el centésimo de miligal, es decir 0,01 mgal.

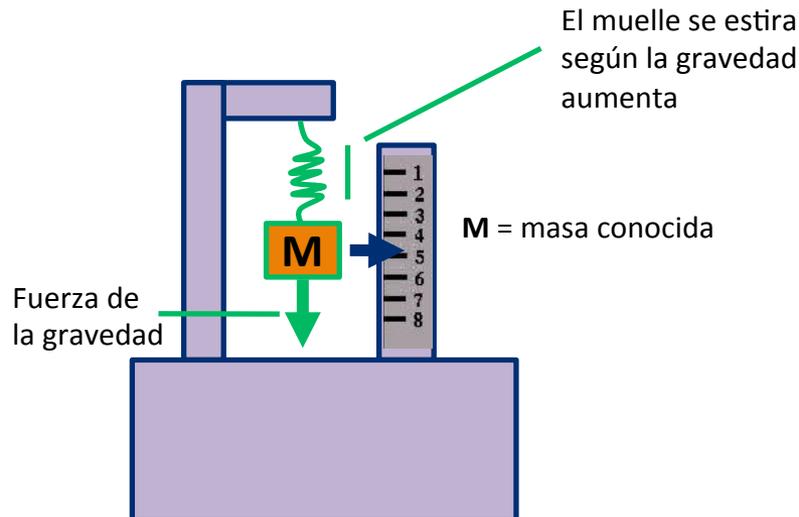
MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- Clásicamente se han empleado 3 aparatos:
 - **Balanza de torsión:** mide las distorsiones del campo gravitatorio causadas por cuerpos de densidades anómalas enterrados en el subsuelo como de domos de sal o cuerpos de cromita por ejemplo.
 - **El Péndulo:** mide la gravedad absoluta o relativa.
 - **El Gravímetro:** mide la gravedad relativa.



EL GRAVÍMETRO

- El Gravímetro es un instrumento que mide **directamente las pequeñas variaciones de la componente vertical de la gravedad** (los valores relativos).
- Está formado por una masa **M** suspendida de un muelle o sistema de muelles o fibras de torsión, que varían su longitud en función de la atracción gravitatoria.



- Funcionamiento del Gravímetro:
 - Las pequeñas variaciones de la gravedad se traducirán en variaciones del peso mg o lo que es lo mismo en **pequeños alargamientos o acortamientos del muelle de suspensión.**

EL GRAVÍMETRO

- Según el sistema de medida de los cambios de la longitud del muelle, los **gravímetros se clasifican en:**
 - Estables.
 - Inestables.



EL GRAVÍMETRO

Gravímetros Estables

- Son aquellos en que **el cambio de longitud del muelle es medido directamente por medio de una adecuada amplificación** ya sea óptica, mecánica o eléctrica.
- El caso más sencillo: **un dinamómetro.**
- **F** = fuerza o peso debida a la gravedad **g** actuando sobre **m**, se tiene:

$$F = mg = K(l - l_0)$$

Siendo:

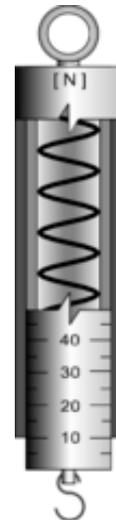
l_0 = la longitud inicial del muelle.

l = longitud final del muelle.

K = constante del muelle.

Gravímetro Hartley

Gravímetro Gulf



EL GRAVÍMETRO

Gravímetros Inestables

- Llamados también “*astáticos*” constan de una masa **M** suspendida inestablemente de un muelle o sistema de muelles de manera que para un determinado valor de **g**, **M** está en posición de equilibrio.
- Con un cambio pequeño en **g**, **M** abandona su posición de equilibrio de manera que pequeños cambios en **g** se traducen en desplazamientos relativamente grandes del muelle.

EL GRAVÍMETRO

Gravímetros Inestables

- Gravímetros Thyssen.
- **Gravímetros Lacoste-Romberg.**
- Gravímetro Worden.
- Gravímetro Marino.
- Gravímetro Aéreo.
- La Balanza de Torsión.



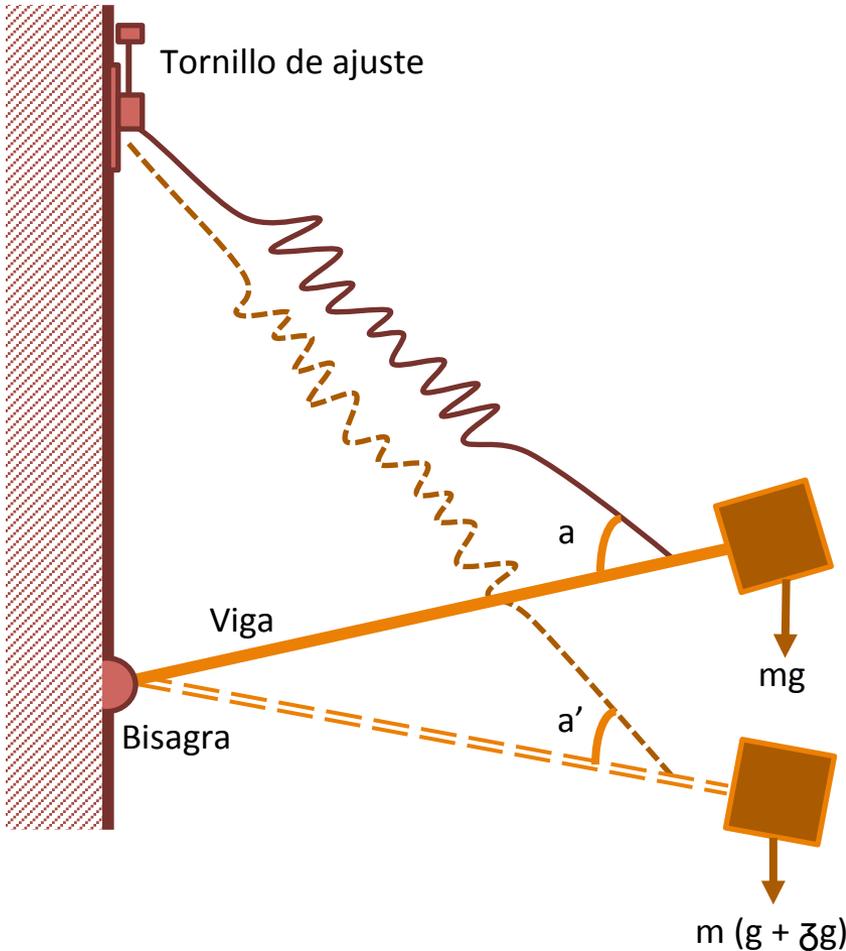
EL GRAVÍMETRO

Descripción del Gravímetro Lacoste-Romberg

- El gravímetro LCR, es un gravímetro inestable con un muelle metálico, caracterizado por estar hecho de partes metálicas.
- **Este tipo de gravímetros consisten en:**
 - Una masa “ m ” suspendida de un resorte.
 - Sobre esa masa “ m ” ejerce una fuerza “ p ” de atracción de la gravedad que es proporcional a la aceleración de la gravedad “ g ”.
 - El resorte tiene una longitud “ l ” por el efecto de la fuerza, el peso “ p ”.
 - Si “ g ” varía lo hará “ p ” y por lo tanto varía la longitud del resorte.

EL GRAVÍMETRO

Funcionamiento del Gravímetro LCR



- Este tipo de gravímetro incorpora una viga y una bisagra.
- La masa “m” se ve atraída por la fuerza de la gravedad y se desplaza estirando el muelle.
- La bisagra permite el movimiento.
- Un tornillo de ajuste, regresa la masa a su posición inicial, moviéndola gracias a la bisagra.
- Midiendo este desplazamiento, el gravímetro da valores de gravedad relativa en cada punto de medida.

EL GRAVÍMETRO

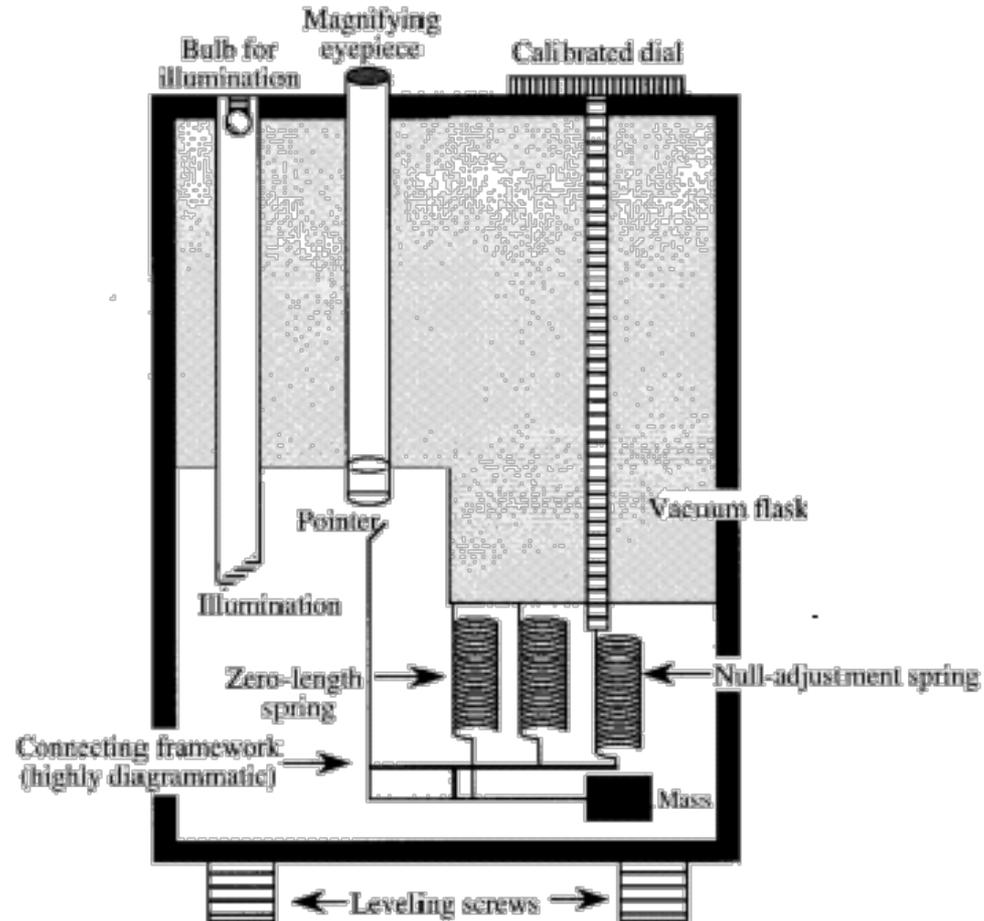
Descripción del Gravímetro Lacoste-Romberg

- El gravímetro debe mantenerse a temperatura estable, ya que la expansión y contracción térmica de los metales es más grande que en el caso de los gravímetros hecho con cristal de cuarzo. Este tipo de gravímetros están termostatzados.



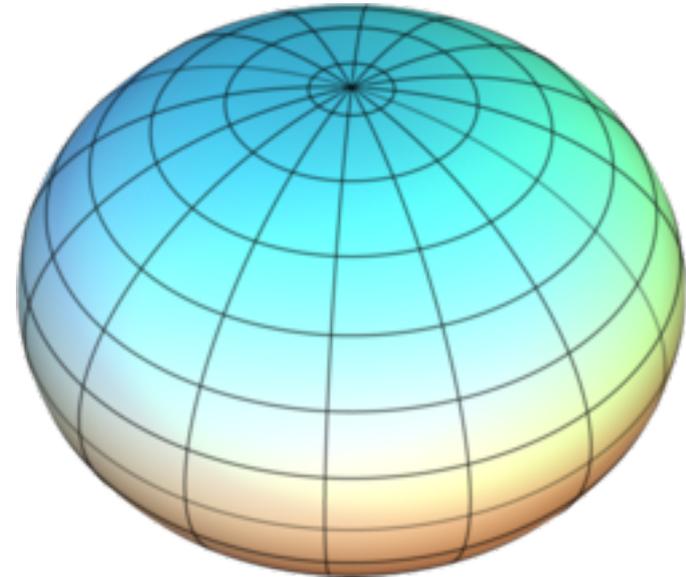
EL GRAVÍMETRO

Esquema del interior de un Gravímetro Lacoste-Romberg



VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

- Si la Tierra fuera una esfera perfecta, con densidad uniforme y no girara en torno a su eje, la gravedad sería igual en todos sus puntos.
- En realidad, la Tierra se asemeja matemáticamente a un elipsoide de revolución, con un radio que es mayor en el Ecuador que en los Polos (unos 22km) y un exceso de masa en ese punto, por ello hay que hacer correcciones en el cálculo de la gravedad.



VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

- El valor de la fuerza de la gravedad en la Tierra, a nivel de la superficie del mar es 9.80665m/s^2 .
- Pero, este valor no es exactamente igual en todos los sitios ya que existen variaciones debidas a diferentes factores:
 1. **LA LATITUD:** la rotación de la Tierra hace que los cuerpos experimenten una fuerza centrífuga que varía según la latitud. La fuerza centrífuga es máxima en el ecuador y nula en los polos. Por otro lado, la fuerza de atracción gravitatoria es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Esto significa que en el Ecuador la fuerza de la gravedad es menor (aproximadamente un 0,5% menor que en los polos).
 2. **LA ALTITUD:** con la altura, aumenta la distancia al centro de la Tierra por lo que disminuye la fuerza de la gravedad.
 3. **EL TIEMPO:** a lo largo del día varían las mareas y, se produce una deriva instrumental.

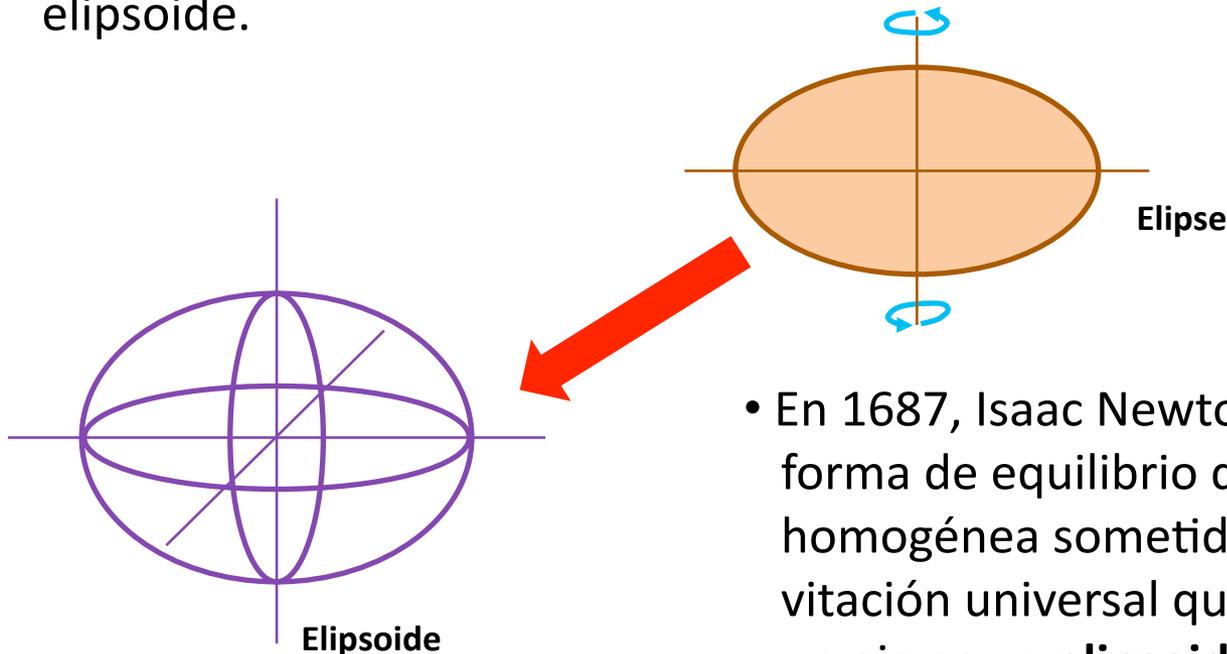
VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

1. CON LA LATITUD:

- Como la Tierra está achatada por los Polos, la distancia a su centro es máxima en el Ecuador (valor de gravedad mínimo) y mínima en los Polos (valor de gravedad máximo).
- Efecto de rotación de la Tierra: la fuerza centrífuga es máxima en el Ecuador y nula en los Polos y siempre opuesta a la fuerza de la gravedad.
- La gravedad normal en el Ecuador es de 978031,8456 mgal, mientras que en los Polos es de 983217,7279 mgal, es decir existe una diferencia de $\sim 5,2$ Gal o 5200 mgal entre el Ecuador y los Polos.
- LA ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD ES FUNCIÓN DE LA LATITUD.

LA FORMA DE LA TIERRA

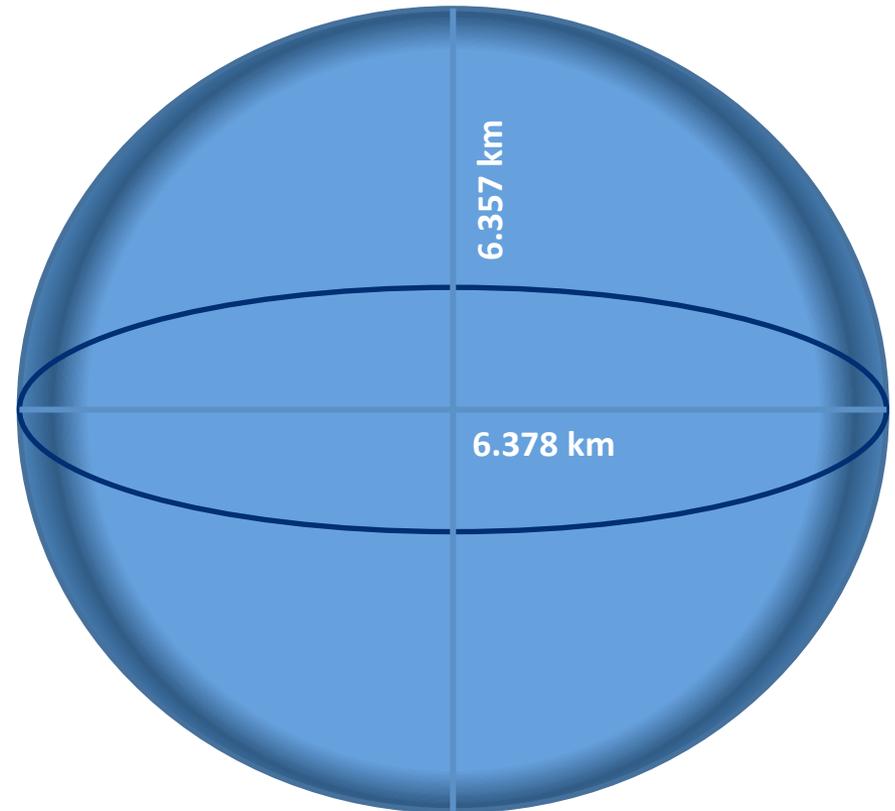
- La Tierra no tiene forma de esfera, se encuentra achatada en los polos y presenta un abultamiento en el ecuador.
- Debido a ello, su forma se asemeja a un cuerpo geométrico denominado elipsoide.



- En 1687, Isaac Newton enuncia que la forma de equilibrio de una masa fluida homogénea sometida a las leyes de gravitación universal que gira alrededor de un eje es un **elipsoide de revolución** aplastado por los polos.

DIMENSIONES DE LA TIERRA

- Radio = 6.371.228 metros.
- La Tierra no es esférica sino un elipsoide.
- La distancia del Ecuador al centro del planeta es de 6.378.137 m, mientras que la misma distancia a cualquiera de los dos Polos resulta ser de 6.356.752 m. Restando estos dos valores resulta que el Eje Ecuatorial es 21.385 metros más largo que el Eje Polar.



VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

EL ESFEROIDE

- Suponiendo la Tierra pastosa formada por capas homogéneas concéntricas y sometida a las **fuerzas de la gravedad que tienden a hacerla esférica** y la **fuerza centrífuga que tiende a aplastarla**, la forma que tomaría es lo que se denomina un esferoide oblato o un elipsoide de revolución obtenido por rotación de una elipse alrededor de su eje más corto.
- La fórmula internacional de la gravedad, utilizada para este esferoide, data de 1930:
$$g_0 = 978,049 (1 + 0,0052884 \operatorname{sen}^2\varphi - 0,0000059 \operatorname{sen}^2\varphi) \text{ cm/seg}^2.$$
$$g_0 =$$
 es la gravedad a la latitud φ y al nivel del mar. El factor 978,049 es el valor de la gravedad en el ecuador ($\varphi = 0$).
- Con esta fórmula se calcula el valor normal o teórico de la gravedad g_0 en cualquier latitud.

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

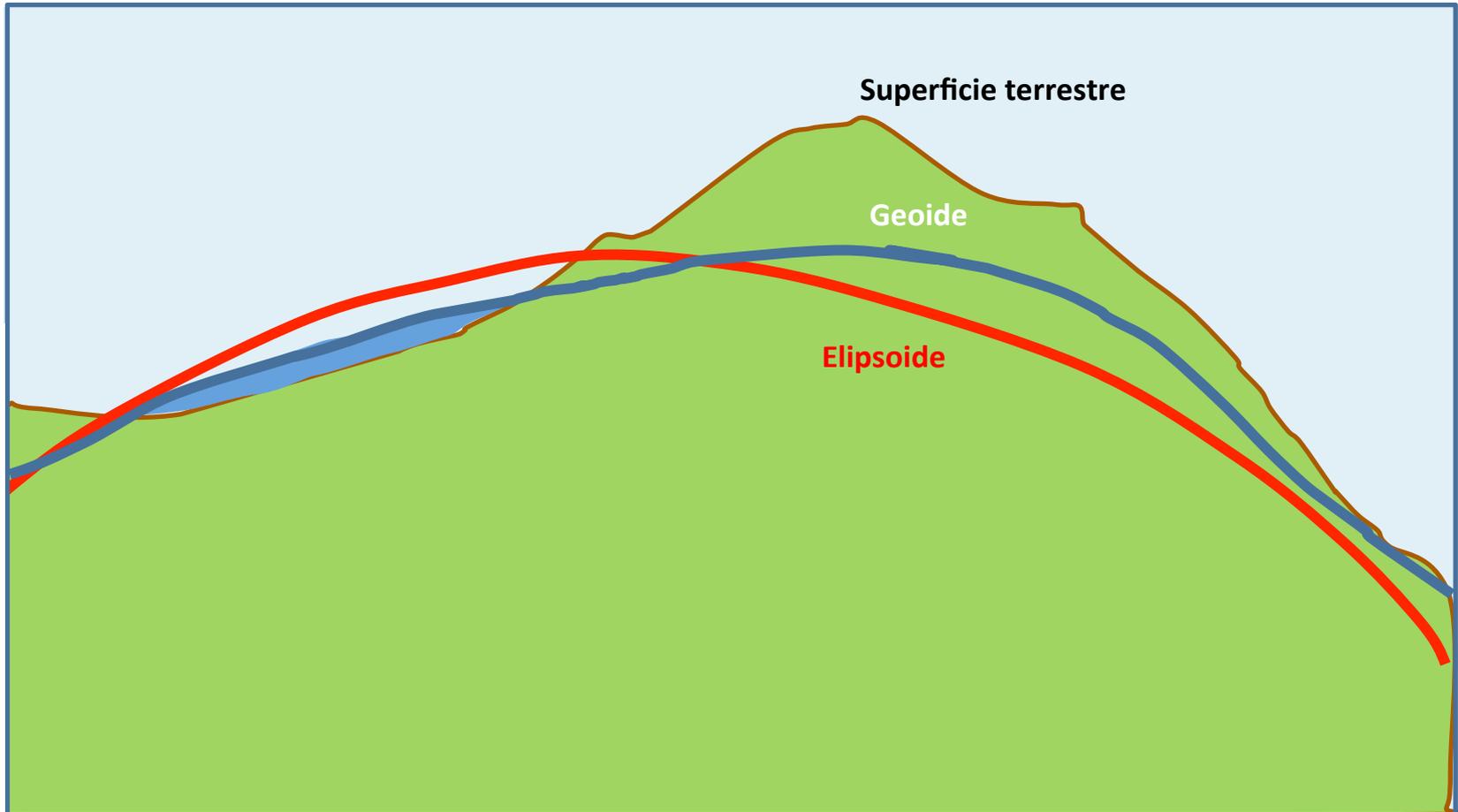
EL GEOIDE

- Se llama GEOIDE a la superficie de equilibrio de los mares de la Tierra si estos se pudieran extender por los continentes a través de canales imaginarios hechos en ellos bajo el nivel del mar.

= **Superficie equipotencial correspondiente al nivel de los mares.**
- Difiere del esferoide:
 - Los continentes y los fondos marinos están irregularmente repartidos sobre la Tierra.
 - Y en las discontinuidades de densidad de la Tierra.

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

GEOIDE/ELIPSOIDE



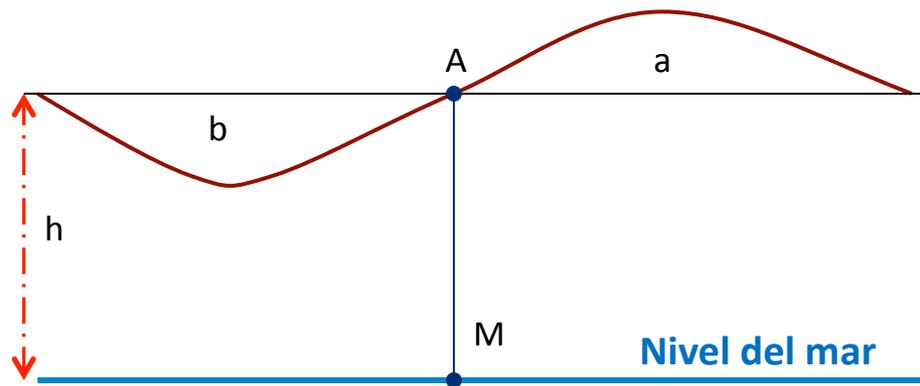
VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

2. CON LA ALTITUD:

- Las mediciones se realizan sobre la superficie terrestre a una **altura h sobre el nivel 0**, por lo que hay que estudiar las variaciones de la gravedad con la altitud.
- Estas variaciones aportan tres correcciones, que permiten reducir la gravedad observada al nivel del mar:
 - a. *Corrección de aire libre.*
 - b. *Corrección de Bouguer.*
 - c. *Corrección topográfica.*

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

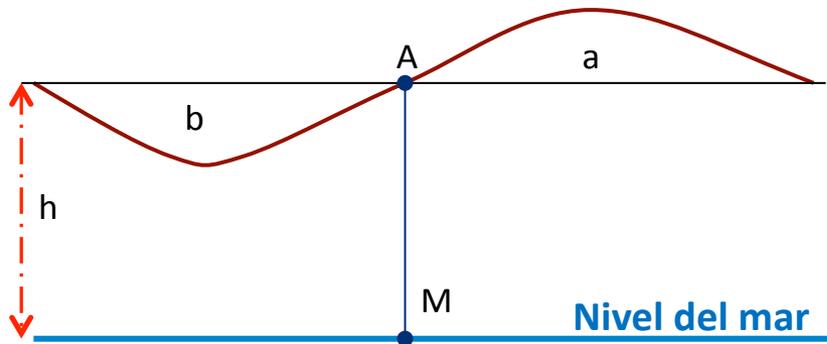
- **Corrección de aire libre**: esta corrección elimina la diferencia entre lo que se mide sobre el terreno y lo que se hubiera medido en el mismo punto pero en el nivel de referencia.
- **Corrección Bouguer**: tiene en cuenta la masa de terreno que se encuentra entre el lugar de la superficie donde se efectúa la medición (A) y el nivel de referencia (nivel del mar). En este caso se necesita la densidad de los terrenos entre el punto de medida y el punto de referencia (A-M).



A = punto de estación

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

- **Corrección topográfica:** sería la debida a la separación de la horizontal en A de la superficie topográfica. **Tiene en cuenta el efecto de la topografía alrededor de la estación.**



A = punto de estación

a = atraerá a la masa unidad puesta en A en el sentido opuesto a la fuerza de la gravedad.

b = este material por debajo actuará en sentido contrario.

Estas tres correcciones permiten corregir el valor observado en A obteniendo el valor g en el punto M.

VARIACIONES DE LA GRAVEDAD SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE

3. CON EL TIEMPO:

- **Efecto de las mareas:** a causa del efecto lunisolar, el geoide se deforma hasta unos 75 cm. Tiene dos puntos máximos y dos mínimos a lo largo de un día. Estos valores se obtienen de tablas específicas para cada lugar del planeta.

El efecto de las mareas es poco importante en prospección, se elimina con la corrección de deriva.

- **Deriva instrumental:** la fatiga del muelle de los gravímetros que junto con la influencia de la temperatura ambiente puede causar una variación en las medidas desde menos de 0,1 u.g. hasta 10 por hora, depende del aparato empleado.
- Se denominan “mareas terrestres” al efecto lunisolar o atracción gravitatoria de la Luna y el Sol que provoca deformaciones opuestas en el geoide, que a su vez se van moviendo de lugar un poco cada día hasta dar la vuelta completa en cuatro semanas.

PROSPECCIÓN GRAVIMÉTRICA

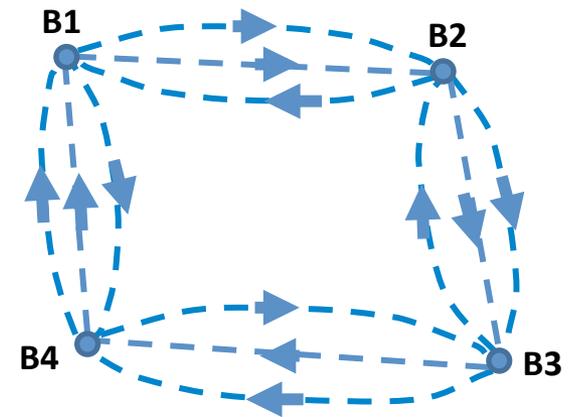
- En la prospección gravimétrica las medidas son pasivas. Se obtienen datos de los cambios de gravedad sin aportar una energía externa.
- Se mide el valor de g en cada punto.
- El tiempo de medida en cada punto no debe superar los 5 min.
- Cada punto medido tiene que estar identificado con sus coordenadas.

TRABAJO DE CAMPO

- El objetivo de toda **prospección gravimétrica** es el de determinar los valores relativos de la gravedad en diferentes puntos de la superficie terrestre.
- Para ello, el primer paso es distribuir los puntos o estaciones de gravimetría que van a ser medidos, en un plano topográfico, estableciendo una densidad de puntos por km² que será función del detalle de la exploración.

• TOMA DE DATOS:

- Para realizar una prospección con alta precisión, lo primero es establecer una Red de Bases. Las bases son puntos donde la gravedad se determina con mucha precisión. Esta red se relaciona con alguna estación de la **red nacional de gravimetría**, de modo que se puedan determinar los valores absolutos de la gravedad en todas las bases.
- Se escogen zonas de fácil acceso, bien señalizadas, con una distancia entre ellas tal que permita que el intervalo de tiempo entre lecturas de dos bases consecutivas sea lo menor posible (deriva mínima) y que haya facilidad para observar repetidas veces las bases a lo largo de la red (para tener un mayor control de la deriva). El enlace entre las bases sucesivas B1, B2... se realiza de la siguiente forma:



Las lecturas se toman en el orden:
B1-B2-B1-B2-B3-B2-B3...

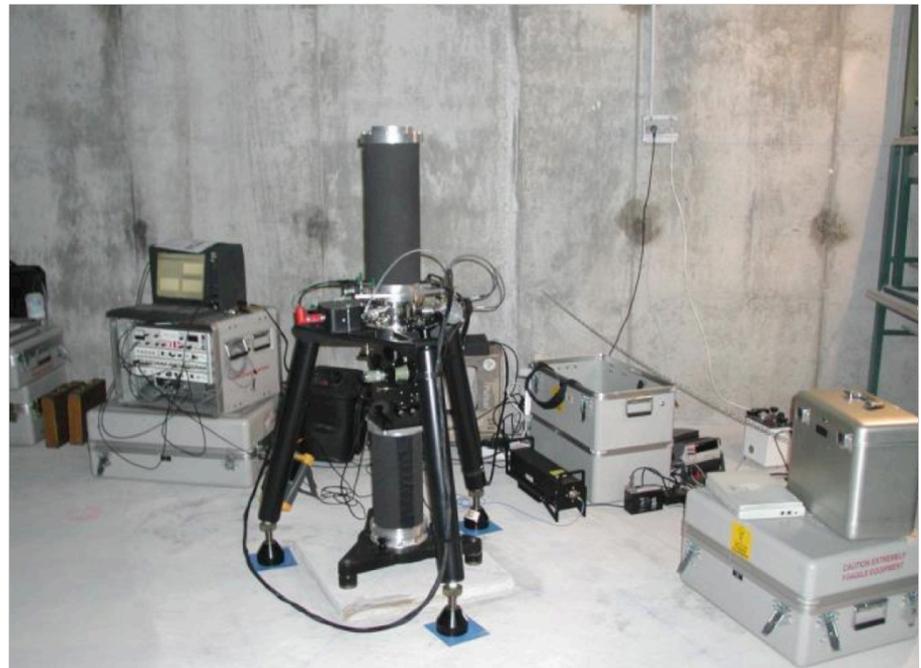
TRABAJO DE CAMPO

- Se establece un circuito cerrado. Una vez determinados los valores gravimétricos de los enlaces de bases (corregidos por la deriva) **se realiza un ajuste matemático de la red.**
- **La distancia entre las bases variará en función de la topografía del terreno.**
- La situación de las bases debe ser en zonas estables, que no varíen por posibles cambios de las masas circundantes (obras nuevas...) o inestabilidad de la corteza (presencia de fallas, etc...).
- Establecida la red de bases, **el resto de las estaciones se refieren fácilmente a los puntos de red** con lo que el trabajo queda perfectamente enlazado.
- Para el control de la deriva instrumental, se vuelve **cada dos horas a la base más próxima** a la zona de trabajo, realizando una medida.

TRABAJO DE CAMPO

- La distancia entre bases suele ser de **10-15 km** en **prospección petrolífera y mucho menor en las prospecciones mineras**.
- El tiempo necesario para nivelar el gravímetro y realizar una lectura es inferior a cinco minutos.
- El número de estaciones/día es muy variable, depende de las condiciones topográficas, transporte, dimensiones de la zona y espaciamiento entre estaciones. Se estima unas 40 estaciones/día.

- Gravímetro con el que se definió el punto de gravedad absoluta de Torrelavega, que forma parte de la red de puntos gravimétricos de España.
- Se encuentra en la Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía.
- La red esta conformada por un total de 20 puntos uniformemente distribuidos por toda la península ibérica
- Norte de España dos puntos uno en Oviedo y otro en Torrelavega.



CORRECCIÓN DE LA DERIVA INSTRUMENTAL

- **DERIVA**: diferencia entre dos lecturas realizadas en una misma estación en un cierto intervalo de tiempo. Estas medidas deberían ser las mismas pero no lo son debido a la baja repetibilidad del gravímetro. Sus diferencias suelen ser de algunas centésimas de miligal por día.
- Las **lecturas del instrumento** deberán ser corregidas con los **valores que obtengamos de la deriva**, de tal manera que los valores corregidos **se aproximen lo más posible a los que hubiéramos obtenido si todas las estaciones las hubiéramos realizados simultáneamente y con el mismo instrumento**.
- Una vez realizadas estas correcciones, el valor resultante de la diferencia entre el **valor medido y el valor normal**, tanto positivo como negativo, dará la dimensión de la **anomalía**.

DENSIDAD DEL TERRENO

- Conocer la densidad del terreno en el que se realiza la prospección gravimétrica, es necesario tanto para realizar la corrección de Bouguer como la corrección topográfica.
- De manera general, se puede considerar que la densidad oscila entre 2.3 (densidad media de los terrenos sedimentarios) y 2.67 (densidad media de la corteza terrestre).
- Se puede hacer una determinación previa de la densidad del terreno cogiendo muestras de las litologías existentes de testigos de sondeos si existieran en la zona, conociendo así la estratigrafía.
- **Una vez realizadas estas correcciones, el valor resultante de la diferencia entre el valor medido y el valor normal, tanto positivo como negativo, dará la dimensión de la anomalía.**

INTERPRETACIÓN

- Lo que se mide en cada estación, en el trabajo de campo, son las variaciones relativas de g en la vertical.
- Para realizar la interpretación de los datos obtenidos en la prospección gravimétrica, es necesario conocer la densidad de las rocas para calcular el “contraste de densidad” entre el valor que se prevé encontrar y el real.
- Las **diferencias locales de la gravedad** están relacionadas directamente con la **densidad de las rocas infrayacentes**.
- **Los domos de sal, los cuerpos de sulfuros masivos o cuerpos de cromita, las fallas, los anticlinales y las intrusiones ígneas son señalados generalmente por cambios en la gravedad.**
- Las **formas de las anomalías son comparadas con curvas teóricas** originadas por masas de distintas formas, densidad y profundidad.

INTERPRETACIÓN

- Para realizar la interpretación de los valores obtenidos, estos deben ser corregidos teniendo en cuenta:
 1. Las variaciones de la gravedad a lo **largo del día producidas** por los cambios de posición del sol y de la luna (efecto lunisolar o de las mareas) y por la deriva instrumental.
 2. Las diferencias de **altitud de las estaciones gravimétricas** entre sí y con relación al plano de referencia (corrección de aire libre, corrección de Bouguer, y corrección topográfica).
 3. La forma de la Tierra: esferoide normal que da lugar a la **corrección de latitud**. Esta se hace con tablas que dan el cambio de la gravedad con la latitud.

INTERPRETACIÓN

- El valor de la anomalía de Bouguer A_B vendrá dado por la expresión:

$$A_B = \text{grav. observada} + \text{corr. mareas} + \text{corr. Derivada} + \\ + \text{corr. Aire libre} - \text{corr. Bouguer} + \text{corr. Topográfica} - g_0$$

Siendo g_0 el valor teórico de la gravedad al nivel del mar para la latitud considerada.

- Una vez corregidos los valores observados de la gravedad se presentan en un mapa de **anomalías de Bouguer** en el que están situadas todas las estaciones gravimétricas, trazando las curvas isoanómalas (curvas de igual valor de A_B), a intervalos entre 0.5 mgls y 0.2 mgls.

INTERPRETACIÓN

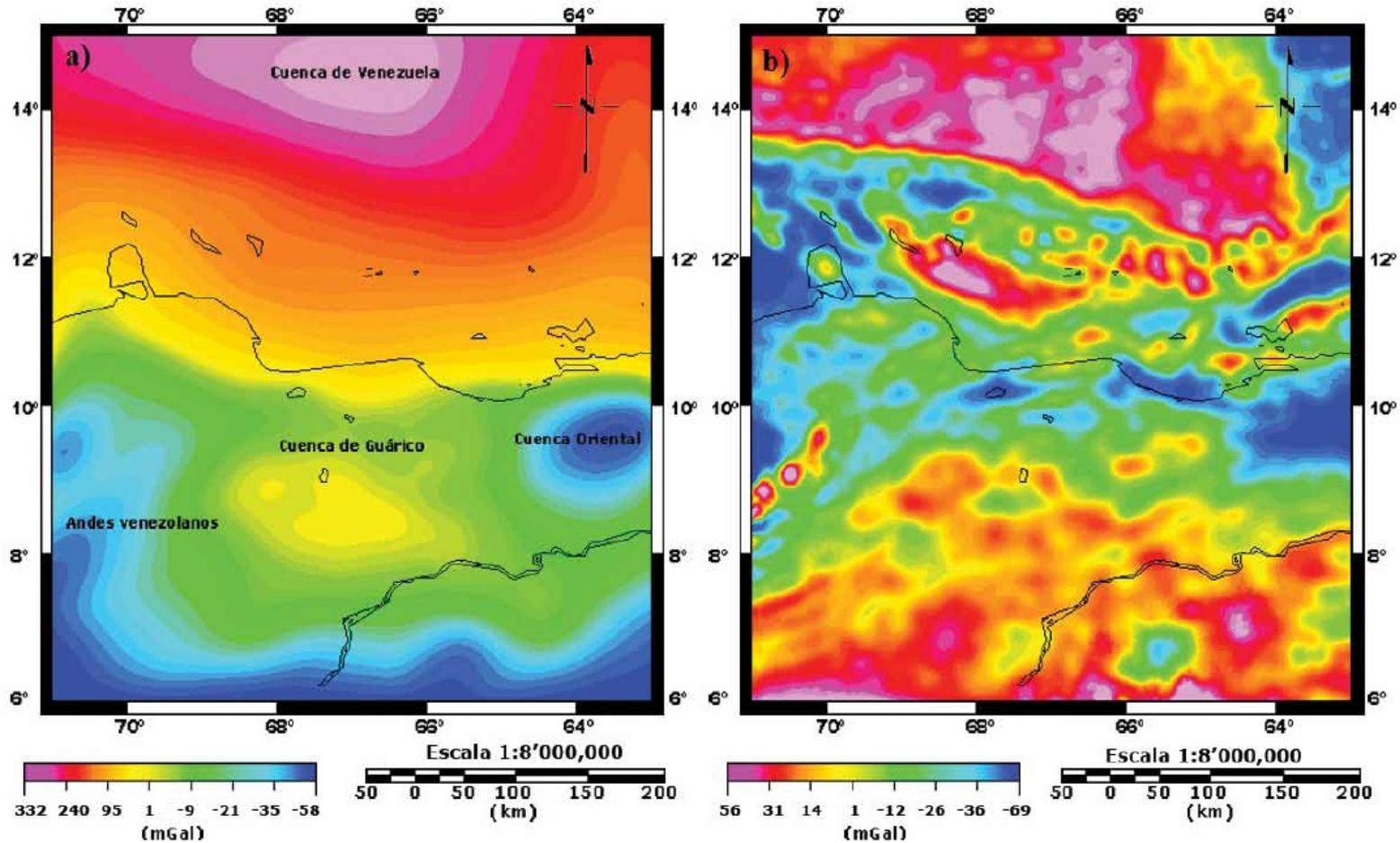


Figura 4. Mapas regional (a) y residual (b) obtenidos a partir de la continuación analítica de campo hacia arriba a 40 km. El residual se calcula como la diferencia entre el mapa regional y el mapa de anomalía de Bouguer completa. En ambos mapas se colocó la línea de costa como referencia de ubicación.

INTERPRETACIÓN

- **Cualquier variación horizontal en densidad causará una variación horizontal de la gravedad.**
- Son estas **variaciones horizontales** las que aparecen en un **mapa gravimétrico**.
- Cualquier **condición geológica** que produzca una variación horizontal en la densidad produciría un cambio horizontal en la gravedad = una anomalía gravimétrica que podría ser producida por:
 - Un depósito mineral o un dique de densidad superior a la densidad media de las formaciones geológicas.
 - Un levantamiento de capas de diferente densidad producido por cualquier cambio estructural que dará lugar a una anomalía gravimétrica cuya magnitud dependerá de los contrastes de densidades de las diferentes capas así como de sus espesores, forma y profundidad.

INTERPRETACIÓN

- La prospección gravimétrica presenta una limitación principal que viene dada porque **los valores observados no son suficientes para definir la distribución de las masas que los producen.**
- **Una masa grande de una determinada densidad y próxima a la superficie produciría una anomalía gravimétrica semejante a la originada por una masa pequeña de gran densidad y a mayor profundidad.**
- Por esta razón **no es posible determinar la posición exacta y la forma de una masa anómala.** Se pueden establecer límites sup e inf de la posible profundidad.
- **La interpretación final será tanto más aproximada cuanto mayor sea la información geológica de la zona.**

RESULTADOS

- Los resultados se presentan como mapas de anomalías de Bouguer.

[Esta foto](#) de Autor desconocido está bajo licencia [CC BY-NC](#).

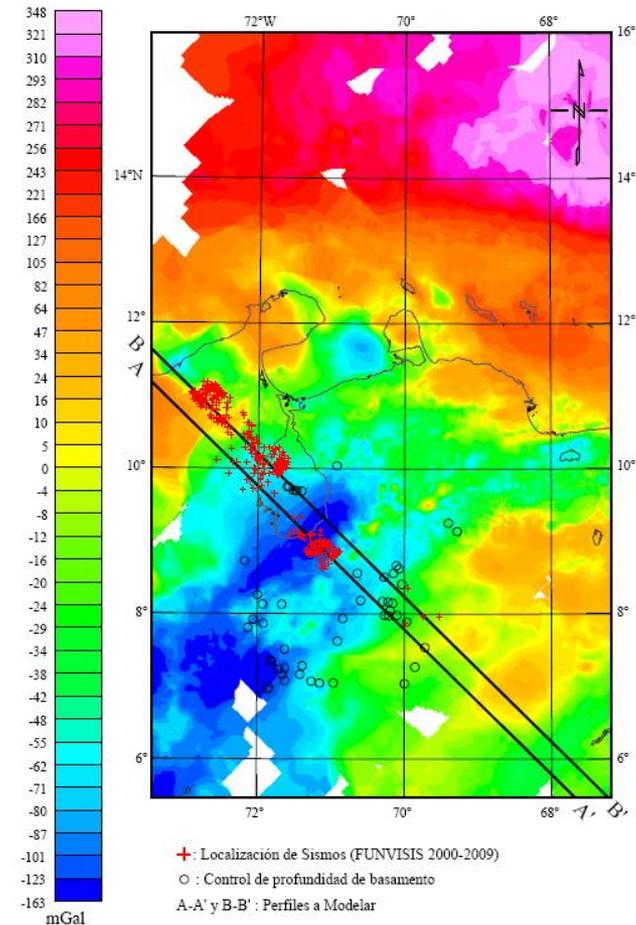


Figura 5. Mapa de Anomalia de Bouguer Total de las estaciones gravimétricas mostradas en la Figura 2. Densidad de Bouguer: $2,67 \text{ g/cm}^3$. Nivel de referencia para la reducción: nivel de mar. Se muestra la localización de los perfiles A-A' y B-B', de sismos obtenidos del Catálogo Sismológico de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) 2000-2009, así como de pozos con datos de profundidad al basamento recolectados de diversas fuentes.

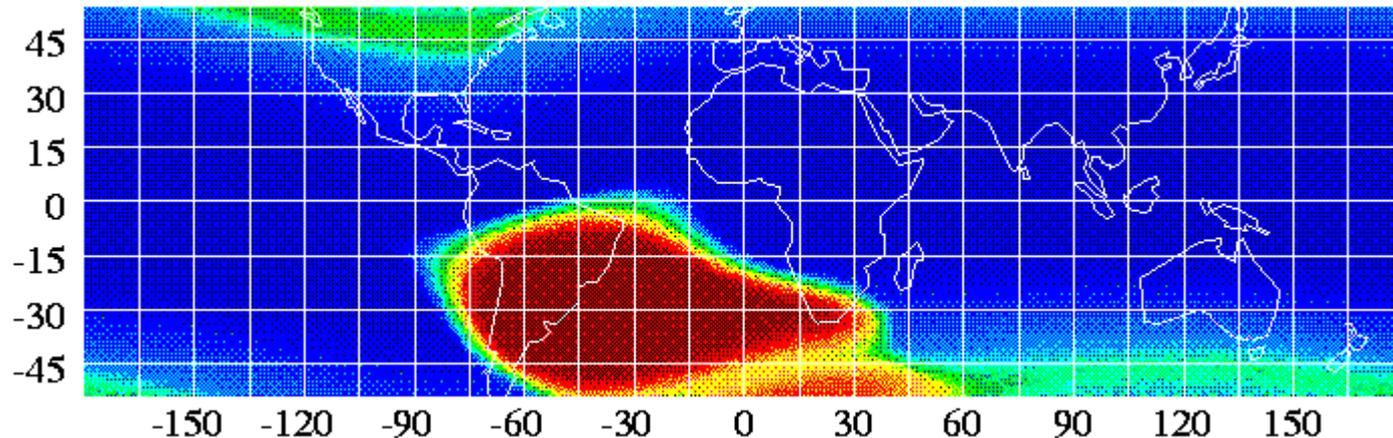
ALCANCE DEL MÉTODO GRAVIMÉTRICO EN LA PROSPECCIÓN MINERA

- Se emplea como **método auxiliar sobre objetivos específicos bien definidos**.
- Por ejemplo: las anomalías electromagnéticas obtenidas sobre filones de sulfuros estrechos y aislados, zonas grafitosas, y zonas de impregnación débil son tan intensas como las debidas a yacimientos masivos.
- La **gravimetría puede discernir entre las diversas alternativas**: las anomalías de la gravedad sobre **yacimientos masivos son más intensas que las debidas a un filón estrecho** y aislado (masa pequeña) o a zonas grafitosas (poca diferencia de densidad con la roca encajante).

MÉTODOS MAGNÉTICOS

INTRODUCCIÓN

- Los métodos de prospección magnética permiten estudiar la geología del subsuelo, mediante las variaciones que sufre el campo magnético terrestre debido a las propiedades magnéticas de las rocas, o de los yacimientos minerales de magnetita, hematites, ilmenita o pirrotina.
- Este tipo de prospección puede ser terrestre o aérea.



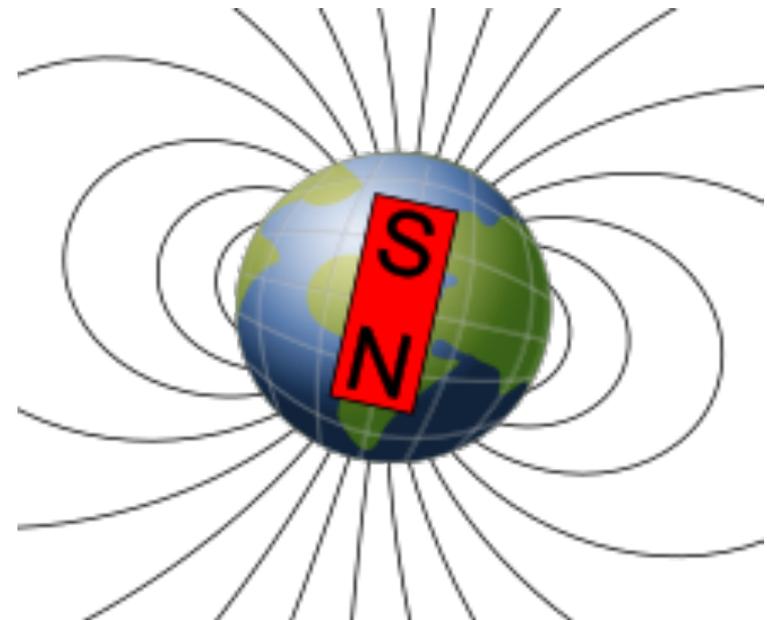
FUNDAMENTOS

- Alrededor de un imán, existen unas líneas de flujo derivadas del flujo magnético generado por el imán y que convergen en sus extremos.
- Los extremos del imán se denominan polos magnéticos.
- El campo magnético producido por el imán tiene una orientación: las líneas de flujo magnético salen del extremo positivo y se dirigen al negativo.
- Donde las líneas de fuerza se encuentren más juntas, la fuerza será mayor.

EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE

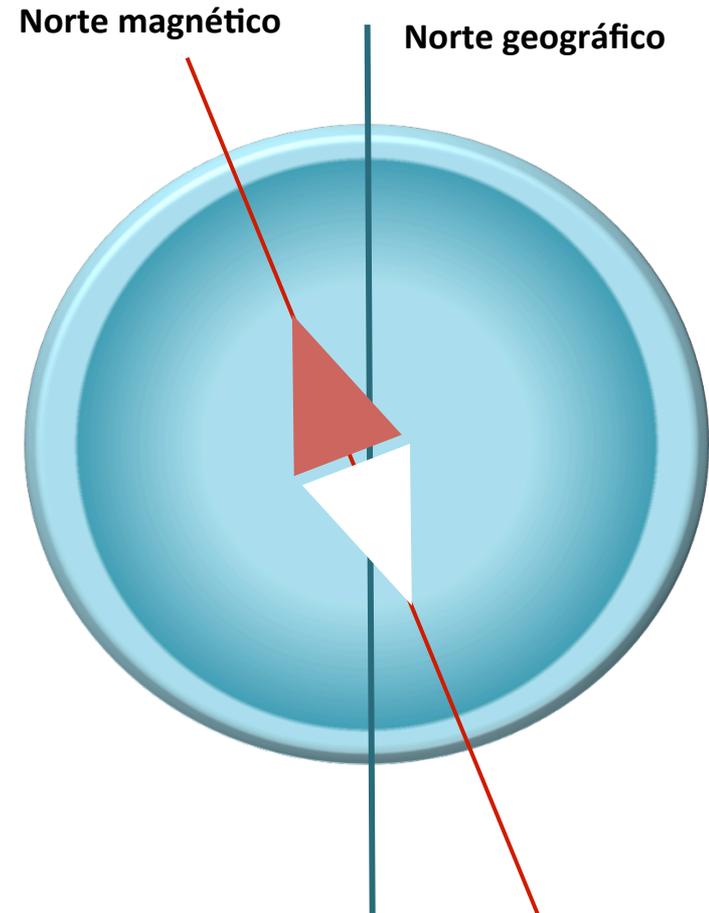
- La Tierra es un imán natural que da lugar al campo magnético terrestre.
- **Campo geomagnético ó campo magnético terrestre:** es un campo magnético generado por el núcleo externo de la Tierra.
- El núcleo externo es una capa líquida de Fe-Ni, donde las corrientes convectivas del Fe metálico generan el campo magnético.

Líneas de fuerza invisibles atraviesan el planeta y se extienden de un Polo magnético al otro.



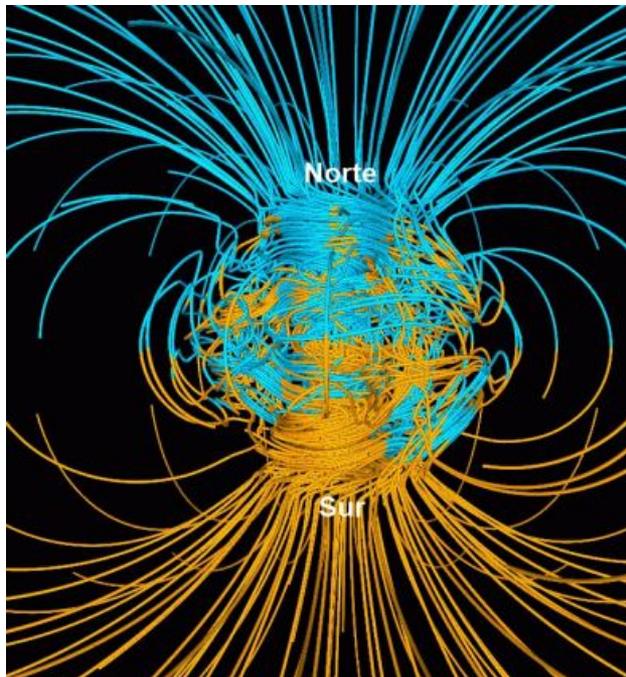
CAMPO GEOMAGNÉTICO

- Existe un Polo Norte magnético que no coincide con el Polo Norte geográfico, está un poco desviado, debido a que fluctúa como consecuencia de las corrientes internas del núcleo.

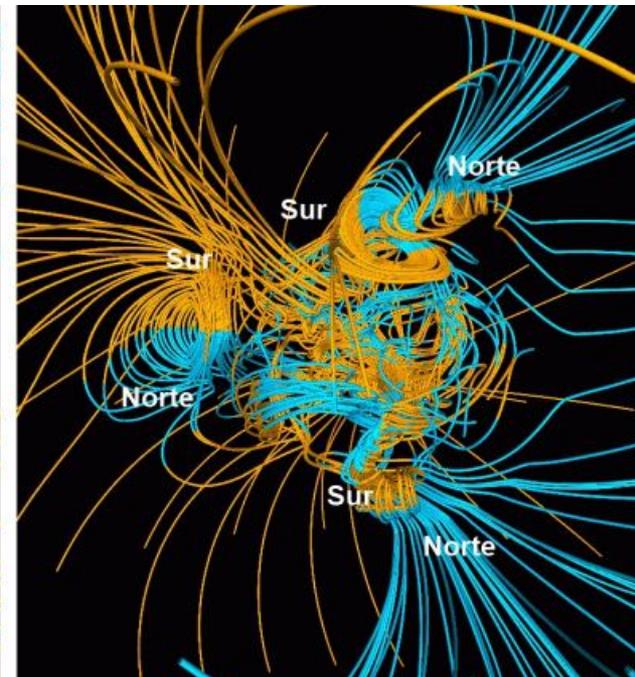


CAMPO GEOMAGNÉTICO

- Cada cierto tiempo los polos magnéticos se invierten. El **Polo Norte magnético** se desplaza, de una manera suficientemente lenta como para que las brújulas sean útiles en la navegación.



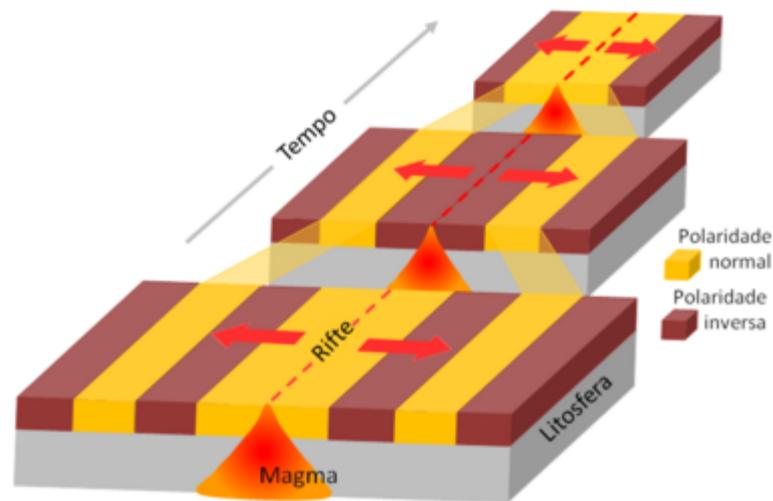
Entre inversiones.



Durante una inversión.

CAMPO GEOMAGNÉTICO

- Estas inversiones dejan un registro en las rocas que han permitido calcular la **deriva continental** en el pasado y el movimiento de los fondos oceánicos resultado de la **tectónica de placas**.



VARIACIONES DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

VARIACIONES EXTERNAS

- Actividad del sol: viento solar.
Movimiento rotacional de la Tierra + mareas atmosféricas.
- Tormentas magnéticas: perturbaciones de hasta 1000 nT. Explosiones solares.
- Duración: horas o días.
- **No recomendable hacer prospección.**



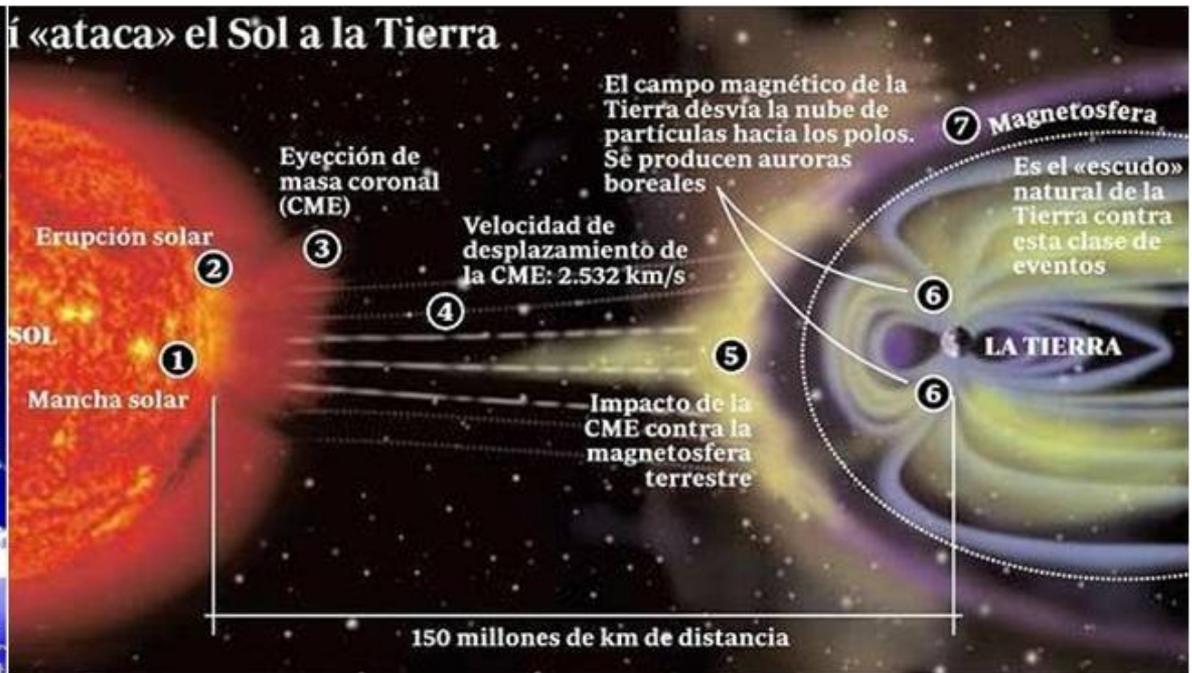
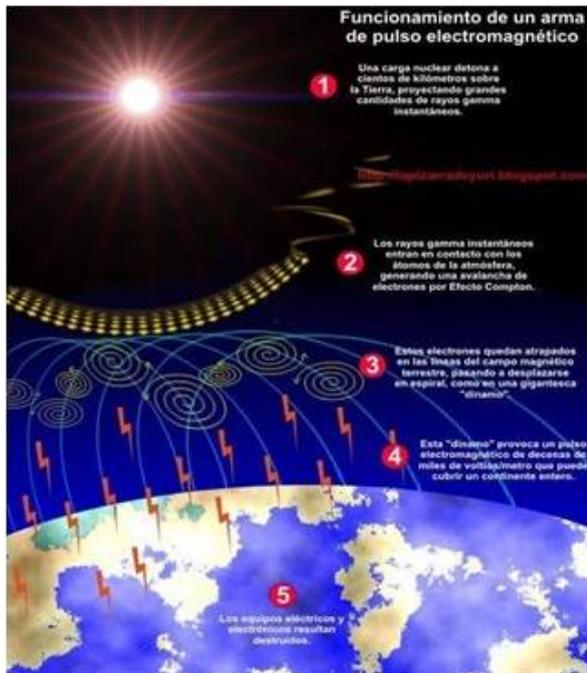
PERIÓDICAS



**NO
PERIÓDICAS**

VARIACIONES DEL CAMPO GEOMAGNÉTICO

TORMENTAS MAGNÉTICAS



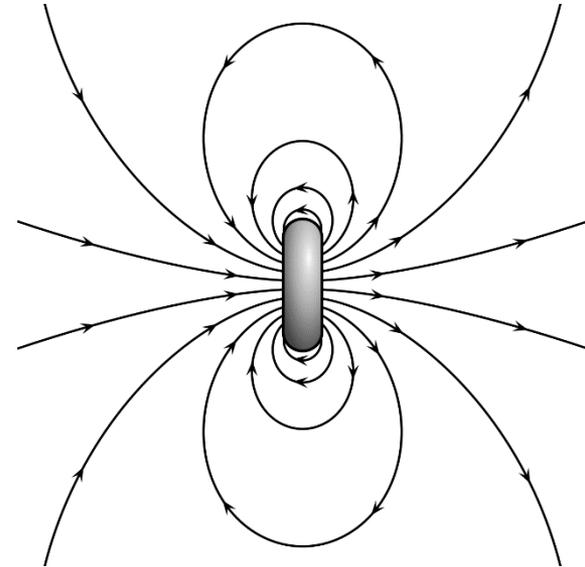
GENERALIDADES

- La **Tierra** se comporta como un **gran imán**, en el que la **dirección e intensidad** del campo magnético **varía** de forma considerable de un **punto a otro de la superficie de la misma**.
- El ángulo formado por el Norte Magnético y el Norte Geográfico se denomina ***declinación***.



GENERALIDADES

- El campo de fuerzas que rodea a las corrientes eléctricas y a los imanes, se llama ***Campo Magnético***.
- Se llama ***Línea de Fuerza*** a una línea continua tal, que su **tangente en cualquier punto coincide con la dirección del campo de dicho punto.**



- **El Método Magnético de prospección se basa en la detección de anomalías en el campo magnético terrestre.**

UNIDADES EN MAGNETOMETRÍA

- En magnetometría se emplean varias unidades:

- 1 Oersted = 1 Gauss = 10^5 gamma = 10^5 nT (T = Tesla). 1 gamma = 10^{-9} T = 1 nT.
- Gauss desarrolló el método para la determinación absoluta del campo geomagnético e inició la observación del campo geomagnético en intervalos regulares. Las unidades Gauss y gamma son las unidades del sistema cgs, la unidad nT es la unidad del sistema SI.
- El campo magnético terrestre es bastante **débil**, del orden de **30.000 nT** en las proximidades del **Ecuador** y de **70.000 nT** en las **regiones Polares**.

MÉTODO MAGNÉTICO

- El método magnético es el método geofísico de prospección **más antiguo aplicado en la prospección petrolífera**, en las exploraciones mineras y en localización de restos arqueológicos.
- En la **prospección petrolífera** el método magnético da informaciones de la profundidad a la que se encuentran las rocas. A partir de ello se pueden localizar y definir las zonas que posiblemente puedan contener **reservas de hidrocarburos**.



MÉTODO DE PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

- En las **exploraciones mineras** se aplica el método magnético en la **búsqueda directa de minerales magnéticos y/o no magnéticos** asociados con los minerales, que ejercen un efecto magnético que pueda ser registrado en la superficie.

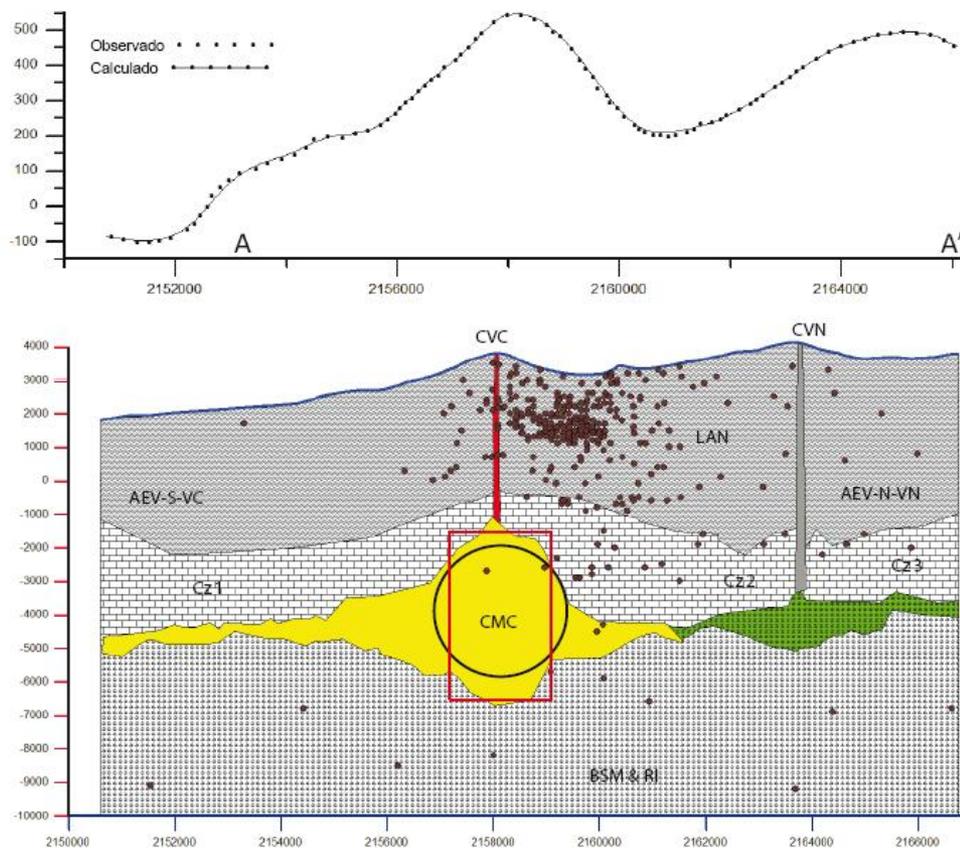


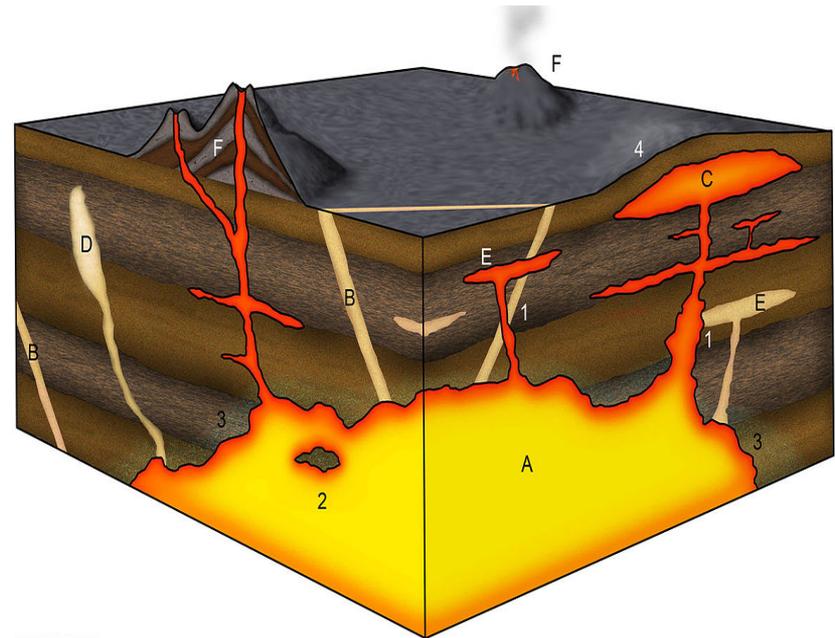
Figura 7. Sección aeromagnética modelada en 2 ½ D. El modelo tiene un error menor al 10% entre la anomalía medida y la calculada. AEV-S-VC: Avalancha de escombros volcánicos al sur del Volcán de Colima; CVC: conducto volcánico del Colima; CMC: cámara magmática del volcán de Colima; LAN: lavas andesíticas del Nevado; CVN: cuello volcánico del Nevado; AEV-N-VN: avalanchas de escombros volcánicos al norte del volcán Nevado; BSM: basamento sedimentario marino.

MÉTODO MAGNÉTICO

- El **método magnético** está basado en medir, sobre la superficie de la Tierra, **las pequeñas variaciones del campo magnético terrestre** que pueden indicar la presencia en profundidad de sustancias magnéticas.
- Además de en prospección minera, este método se usa para estudiar la **geología regional**.
- Mide anomalías causadas **por cambios en las propiedades físicas de las rocas subyacentes. Es un método pasivo**.
- Similar al método gravimétrico, se obtienen **mapas de anomalías y emplean técnicas de interpretación parecidas**.

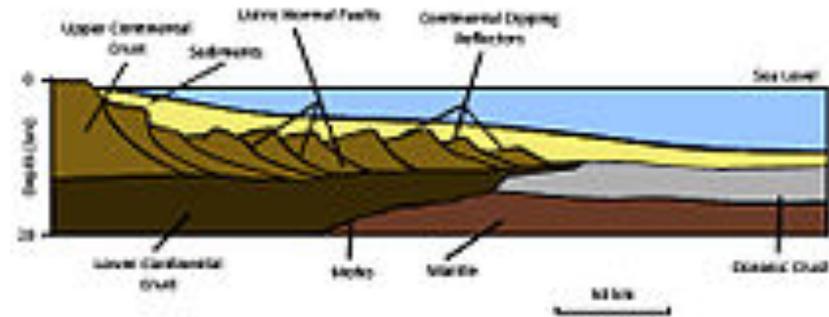
EN GEOLOGÍA

- Para establecer **los contactos de intrusiones ígneas** de emplazamiento somero en rocas sedimentarias.
- Las rocas sedimentarias tienen un magnetismo bajo o nulo en comparación con el generado por intrusiones ígneas, por lo que se usa este método para determinar las variaciones de la intensidad magnética medidas en profundidad que determinen cambios litológicos asociados a estas rocas.

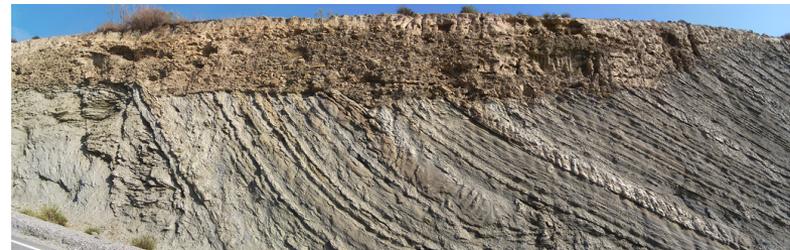


EN GEOLOGÍA

- La magnetometría **aéreo transportada** permite localizar zonas de fallas y **zonas de cizalla**, que pueden contener mineralizaciones.
- Con el método magnético se pueden **delimitar tanto terrenos antiguos actualmente cubiertos por rocas como discordancias**. De esta manera, este método se usa para la exploración de minerales detríticos o de concentraciones de uranio relacionadas con discordancias.



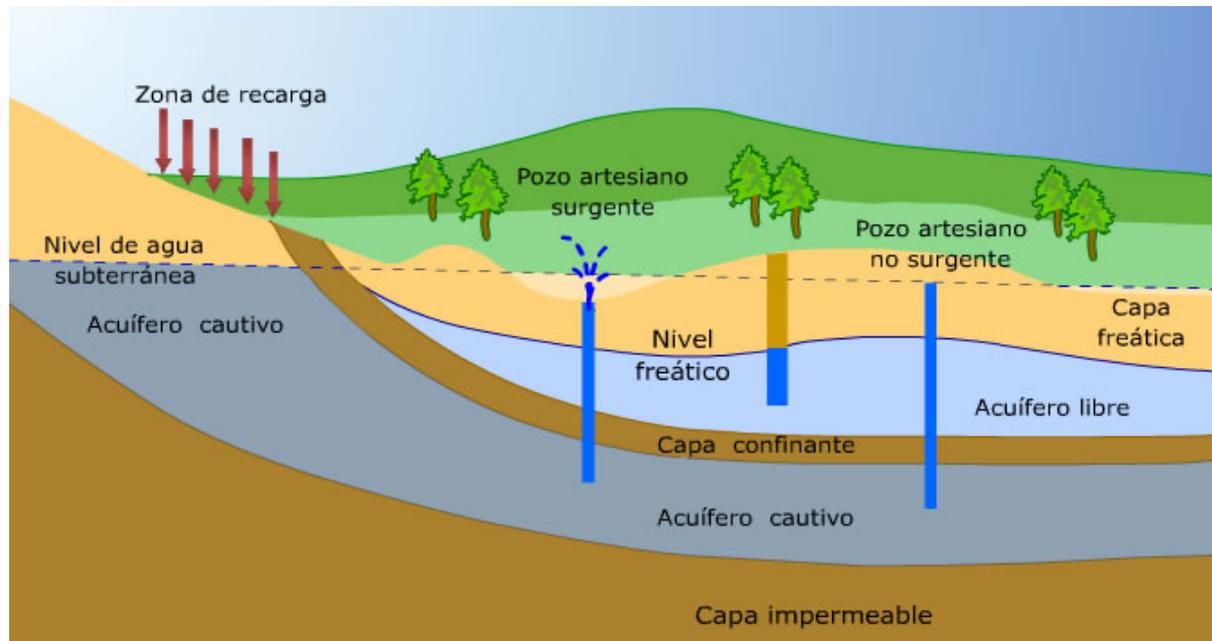
Fallas profundas



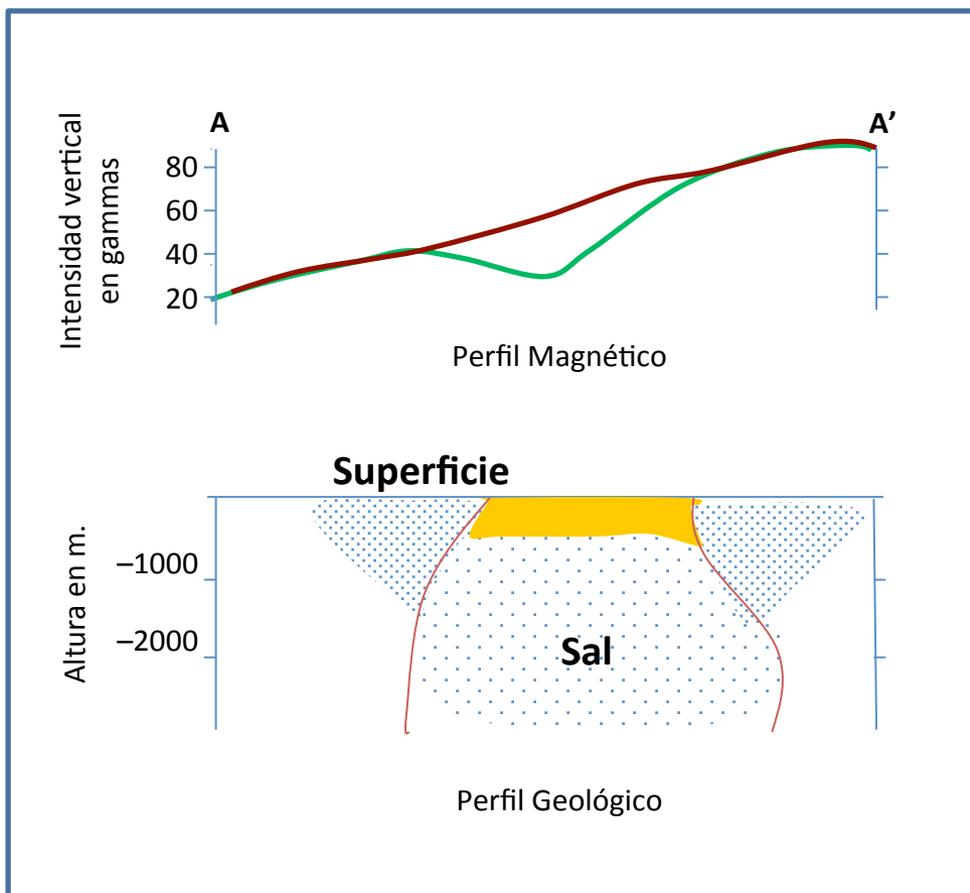
Discordancia angular

EN GEOLOGÍA

- También puede emplearse en la **localización de aguas subterráneas**.
- El conocimiento de sistemas de fracturas y de acuíferos en rocas solidificadas cubiertas por una capa de depósitos aluviales puede facilitar la búsqueda y explotación de agua subterránea.



LOCALIZACIÓN DE DOMOS SALINOS



Ejemplo de modelo magnético de un diapirós, comportamiento diamagnético.

MÉTODO MAGNÉTICO

- Los yacimientos de **óxidos y sulfuros**, como la magnetita o la pirrotina, originan distorsiones en el campo magnético de la Tierra, las cuales pueden utilizarse para la localización de estos yacimientos.
- Se utilizó en 1640 en Suecia para la búsqueda de **magnetita**.
- El método magnético está, entre los métodos de prospección geofísica, entre los más baratos, **más rápidos y sencillos**.



PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS ROCAS

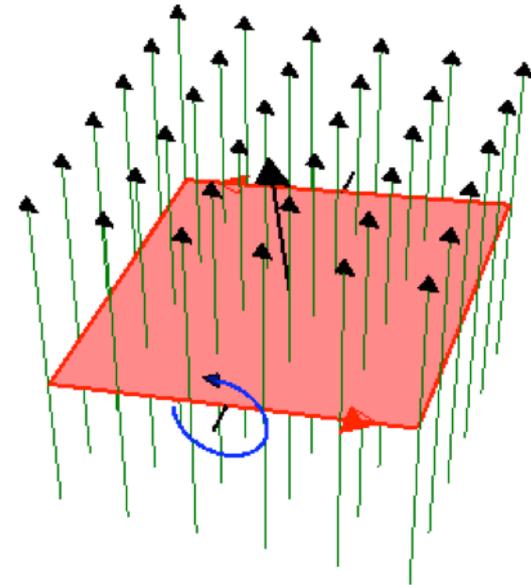
- Al someter una sustancia a un **campo magnético H**, esta se magnetiza. Adquiere una “**intensidad de imanación**” **J** proporcional al campo exterior que viene dada por la ecuación:

$$\mathbf{J} = k\mathbf{F}$$

J = intensidad de imanación (momento magnético por unidad de volumen).

K = constante de proporcionalidad: susceptibilidad magnética.

F = intensidad del campo medida en amp/m – 1.



Estas propiedades se producen a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie, por lo que sólo se encontrarán anomalías magnéticas hasta una profundidad máxima de 30 a 40 km.

SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

- Se conoce como “**susceptibilidad magnética**” (k) a la propiedad que relaciona la capacidad de magnetización (J) de una sustancia o cuerpo rocoso con la magnitud del campo magnético (H) externo en el que se encuentra.
- La susceptibilidad no tiene dimensiones.
- **La susceptibilidad magnética de las rocas depende de la naturaleza y cantidad de minerales magnéticos que contenga.**

SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

- En los materiales geológicos, la susceptibilidad es una propiedad anisótropa.
- La susceptibilidad magnética de una roca depende en primer lugar de su contenido en magnetita y/o pirrotina, la ilmenita juega un papel menos importante.



Pirrotina, mineral con alta susceptibilidad magnética.



Magnetita.

PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LAS ROCAS

- El **magnetismo** de casi todas las **rocas** es función de su contenido en **minerales ferromagnéticos**.
- Los **minerales ferromagnéticos** son aquellos que poseen **susceptibilidad relativamente alta** y que son capaces de adquirir **imanación permanente**.
- **Óxidos de hierro o sulfuros**. Los óxidos de hierro forman entre sí soluciones sólidas: Fe_3O_4 (Magnetita) con Fe_2TiO_4 (Ulvoespinela); Fe_2O_3 (Hematites) con Fe_2TiO_3 (Ilmenita).
- La naturaleza de estas soluciones sólidas influye decisivamente en la **determinación de las propiedades magnéticas**. Además, es importante la **composición, el tamaño y forma de los granos ferromagnéticos**.

MAGNETISMO INDUCIDO Y PERMANENTE

- Cuando un cuerpo es colocado en un campo magnético, adquiere una imitación que perderá al ser separado de dicho campo. Es un **magnetismo inducido por el campo**.
- Hay minerales que presentan magnetismo sin estar sometidos a ningún campo exterior: magnetita, pirrotina, cromita. Estos minerales presentan imitación o **magnetismo permanente, remanente o espontáneo**.
- Una roca sometida durante su formación a un campo magnético externo, adquiere una magnetización denominada **primaria**. Si esta magnetización es adquirida posteriormente se denomina **secundaria**.

CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE k

- Las sustancias, se clasifican en función de la susceptibilidad magnética en:
 - DIAMAGNÉTICAS: repelen los campos magnéticos. Estas sustancias y materiales tienen una susceptibilidad magnética débil y negativa en muchos casos, que no depende de la temperatura del material. La mayor parte de los minerales son diamagnéticos, como el CUARZO, la CALCITA, la HALITA, el YESO, la ORTOSA, etc., con valores de k en torno a -10^{-6} . También forman parte de este grupo el aire y el agua.



CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE k

- **Las sustancias, se clasifican en función de la susceptibilidad magnética en:**
 - **PARAMAGNÉTICAS:** minerales atraídos por los imanes pero no se magnetizan permanentemente.
Presentan una susceptibilidad positiva pero débil ($k > 0$).
 La susceptibilidad depende de la temperatura (Ley de Curie-Weis).
 Son paramagnéticos: los minerales de la arcilla, la biotita y la clorita, y otros silicatos como el olivino, los piroxenos y los anfíboles.
 Presentan susceptibilidades en torno a 10^{-4} y a 10^{-5} ...

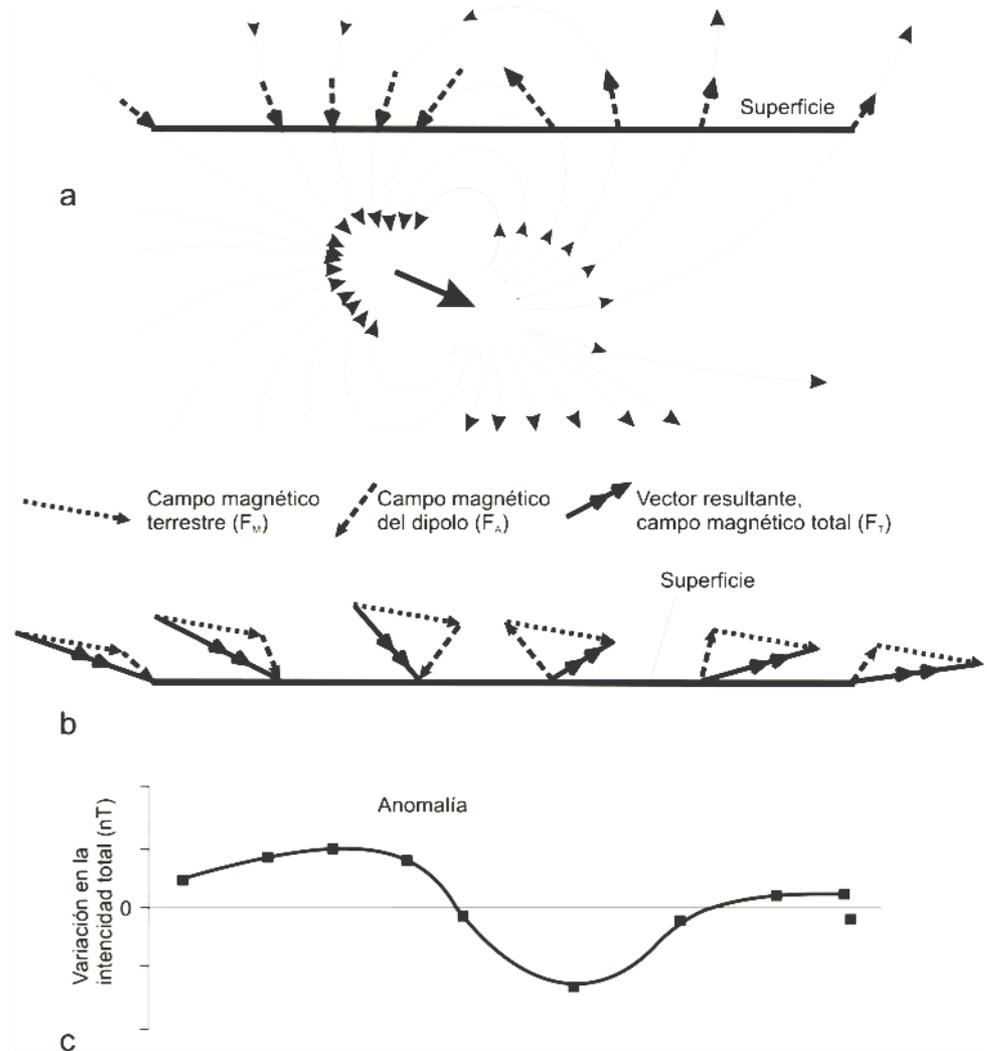


CLASIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE k

- Las sustancias, se clasifican en función de la susceptibilidad magnética en:
 - FERROMAGNÉTICAS: minerales que se ven fuertemente atraídos por los imanes. Una vez imantados conservan cierto magnetismo (magnetismo remanente) al cesar el campo inductor. MAGNETITA, ILMENITA, HIERRO, COBALTO.
- El magnetismo de las rocas es debido a minerales de este tipo, especialmente a la magnetita.



- La detección mediante métodos magnéticos de un cuerpo dado, alojado en el interior de otro, será tanto más probable cuanto mayor sea el **contraste de susceptibilidades** entre la roca buscada y las que la circundan.



EQUIPOS DE MEDIDA

MAGNETÓMETROS

- Las mediciones magnéticas en prospección minera se efectúan en forma de mediciones relativas por medio de **Magnetómetros**.
- Se fundamentan en el hecho de que una **aguja magnética**, convenientemente equilibrada en la estación de referencia, se desvía al ser colocada en otra estación.
- El cambio sufrido por el campo puede medirse tanto en el **ángulo de desviación** como por la **fuerza compensadora necesaria para volver la aguja a su posición de referencia**. La constante de calibrado del instrumento permite expresar el cambio en unidades gamma.



G-858 MagMapper.



G-856 Magnetometer.

EQUIPOS DE MEDIDA

MAGNETÓMETROS

- **Magnetómetros mecánicos**: antiguos magnetómetros que medían el campo magnético con barras imantadas.
- **Magnetómetro de saturación o fluxgate**: formado por dos núcleos de material ferromagnético de alta permeabilidad magnética.
- **Magnetómetro de protones**: realiza un seguimiento de la precesión protónica dentro de un entorno con presencia de campo magnético exterior para proporcionar el valor absoluto del campo magnético total.
- **Magnetómetro de precesión electrónica**: a través de la medida de la precesión electrónica basada en el fenómeno de resonancia magnética, el efecto Zeeman y en la mecánica cuántica, mide la intensidad del campo magnético terrestre.



G-858 MagMapper.



G-856 Magnetometer.

PROSPECCIÓN MAGNÉTICA

- Inicialmente, los instrumentos empleados en prospección magnética medían la componente vertical. Actualmente, los magnetómetros miden el campo total, con una precisión de ± 1 nT.
- Los primeros magnetómetros consistían en imanes de barra que se orientaban en el campo magnético.
- Para medir era necesario una nivelación de precisión y zonas de medida estables.

VARIACIÓN SECULAR

- Se denomina “**variación secular**” al cambio del campo magnético con el tiempo. Esto se evidenció con el registro histórico de las medidas de la declinación magnética y de la inclinación.
- La intensidad del campo magnético principal disminuye aproximadamente un 5% cada 100 años. Estas variaciones no son importantes para una prospección magnetométrica normal, pero sí a escala geológica.

TRABAJO DE CAMPO

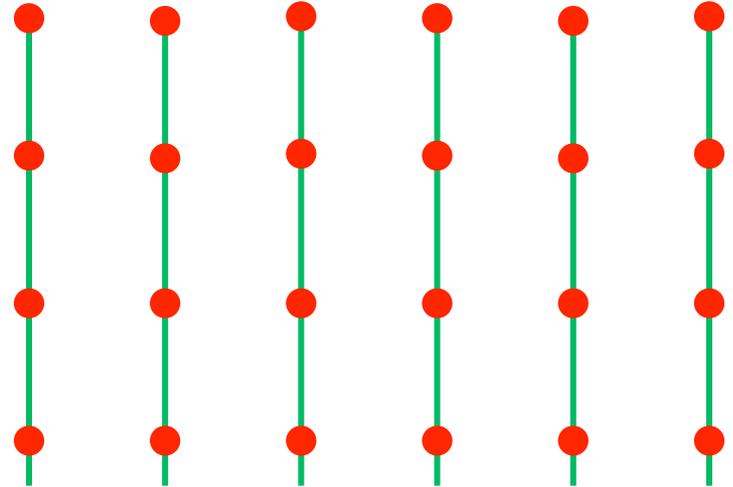
- La prospección magnética puede realizarse en tierra o desde el aire o en barco.
- La **limpieza magnética** es fundamental cuando se trabaja con magnetómetros portátiles sobre el suelo. El operador no debe llevar ninguna clase de objetos de hierro y acero como llaves, navaja, reloj... Otros: cierres de cremallera, hebillas de cinturón, clavos de bota...
- Además, debe tenerse cuidado de no acercarse demasiado a automóviles, alambrados, líneas eléctricas, tuberías, etc.

TRABAJO DE CAMPO

- La prospección magnética puede realizarse en tierra o desde el aire.
- La **limpieza magnética** es fundamental cuando se trabaja con magnetómetros portátiles sobre el suelo. El operador no debe llevar ninguna clase de objetos de hierro y acero como llaves, navaja, reloj... Otros: cierres de cremallera, hebillas de cinturón, clavos de bota...
- Además, debe tenerse cuidado de no acercarse demasiado a automóviles, alambrados, líneas eléctricas, tuberías, etc.

TRABAJO DE CAMPO

- La medición terrestre de una campaña magnética es muy sencilla.
- Se trazan previamente en el campo líneas paralelas entre sí y perpendiculares a las estructuras a investigar, colocando estacas situadas a una distancia fijada previamente.
- Con el **magnetómetro en la mano se va midiendo la intensidad del campo magnético** de cada punto.
- La anomalía se produce cuando pasa sobre un cuerpo litológico de mayor intensidad magnética que las rocas encajantes.



CONTAMINACIÓN MAGNÉTICA

- La intensidad de la anomalía en superficie depende del tamaño y geometría del depósito, buzamiento y profundidad del mismo.
- Puede verse afectada por el contenido en hierro de las rocas encajantes, sobre todo si estas son ferromagnesianas, produciendo dificultades en la interpretación (“ruido”). La intensidad del ruido geofísico debilita la captación de la señal emitida e influye negativamente en la percepción de la anomalía.
- Los factores que influyen en la “contaminación magnética” son los objetos de hierro.

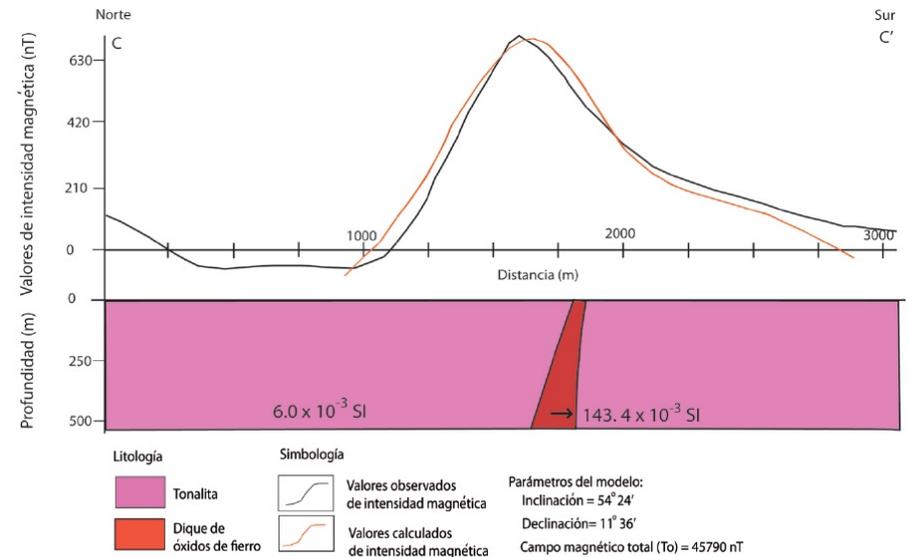
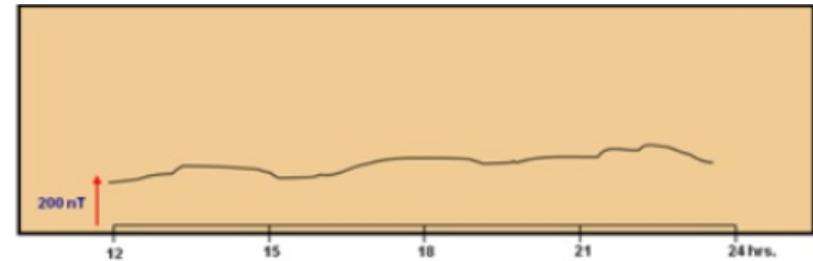


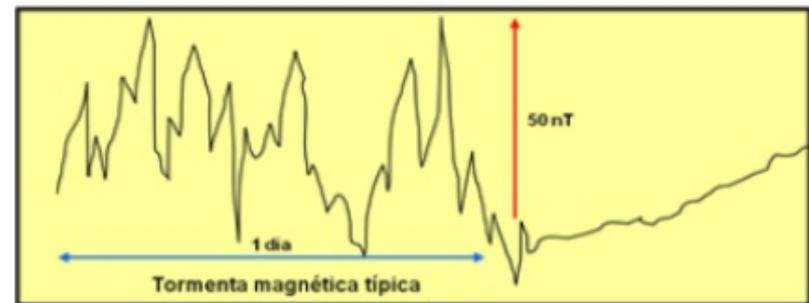
Figura 12. Modelo del perfil magnético C-C'. En la parte superior se compara la respuesta del modelo con el perfil magnético observado. Hacia el sur del perfil se infiere la existencia de tonalita, la cual se encontraría por debajo de una capa delgada de sedimentos de acuerdo con el mapa de la Figura 10.

TRABAJO DE CAMPO

- Otra corrección son las variaciones diurnas del campo magnético, que se realizan con una estación auxiliar con la que se contrasta periódicamente o sirve de referencia tomado periódicamente sus variaciones.
- Las variaciones magnéticas diurnas deben restarse de las medidas tomadas, de acuerdo con la hora. Además de las variaciones diurnas, las mediciones magnéticas se ven afectadas por las tormentas magnéticas (variaciones bruscas y violentas del campo magnético), pero no existe método satisfactorio para su corrección, solamente el de suspender las mediciones durante la tormenta.



Variación Diurna del Campo Magnético día normal.



Tormenta Magnética.

REALIZACIÓN DE MEDICIONES MAGNÉTICAS EN EL CAMPO Y CORRECCIONES NECESARIAS PARA LAS MEDICIONES MAGNÉTICAS

- Aplicando el **método magnético** en la **prospección minera** se determinan **variaciones del campo geomagnético**, anomalías magnéticas relacionadas con un **depósito mineral** (magnetita o pirrotina).
- Las **mediciones magnéticas** se realizan a lo largo de **perfiles** en estaciones de observación a distancias regulares.
- Combinando **perfiles paralelos** se obtiene un **mapa de observaciones magnéticas**.
- La mayoría de los **magnetómetros** utilizados en prospección minera **miden variaciones de la intensidad vertical**.
- Se trata de **mediciones relativas**, cuya precisión es más alta en comparación a las mediciones absolutas.

REALIZACIÓN DE MEDICIONES MAGNÉTICAS EN EL CAMPO Y CORRECCIONES NECESARIAS PARA LAS MEDICIONES MAGNÉTICAS

- El **campo geomagnético** sufre **variaciones con respecto al tiempo** y a su forma como la variación diurna por ejemplo. Se debe corregir los valores medidos.
- La **variación diurna** se corrige **repitiendo la medición de la variación de la intensidad vertical en una estación de base en intervalos de tiempo regulares** desde el principio hasta el fin de la campaña de medición.
- Los **valores medidos en la estación de base se presentan en función del tiempo**, que permite calcular el valor de corrección correspondiente a cada medición en una estación de observación.
- Debido a las variaciones diurnas del campo magnético, las mediciones deben corregirse:
 - Una forma consiste en volver a una estación base cada hora y luego cambiar de base.
 - Otra más práctica pero que requiere de dos magnetómetros, consiste en dejar uno fijo como base para así conocer las fluctuaciones del campo en un punto y descontarlas en los otros.

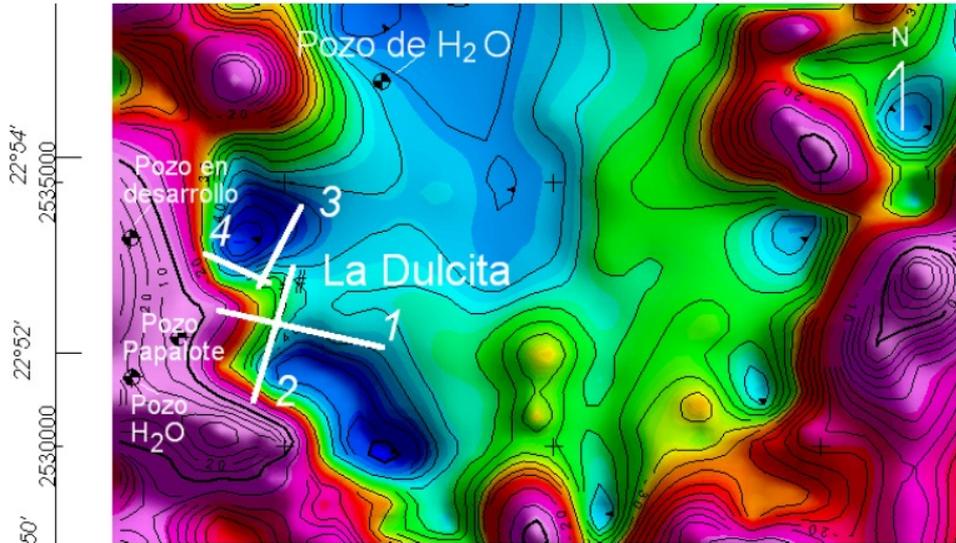
TRABAJO DE CAMPO

- **Corrección de elevación:** de manera general no se necesita una corrección topográfica, salvo en aquellos casos de zonas muy abruptas (gargantas, valles...), donde los materiales de alta susceptibilidad se encuentra aflorando o cerca de la superficie.
- **Corrección de la posición horizontal:** los datos deben ser corregidos para tener en cuenta el efecto de la latitud y la longitud.
- **Reducción al Polo:** se denomina así a la técnica de procesamiento de datos que recalcula los datos de intensidad magnética total como si el campo magnético inducido tuviera una inclinación de 90° .
- Los valores reducidos se presentan en perfiles y/o mapas.

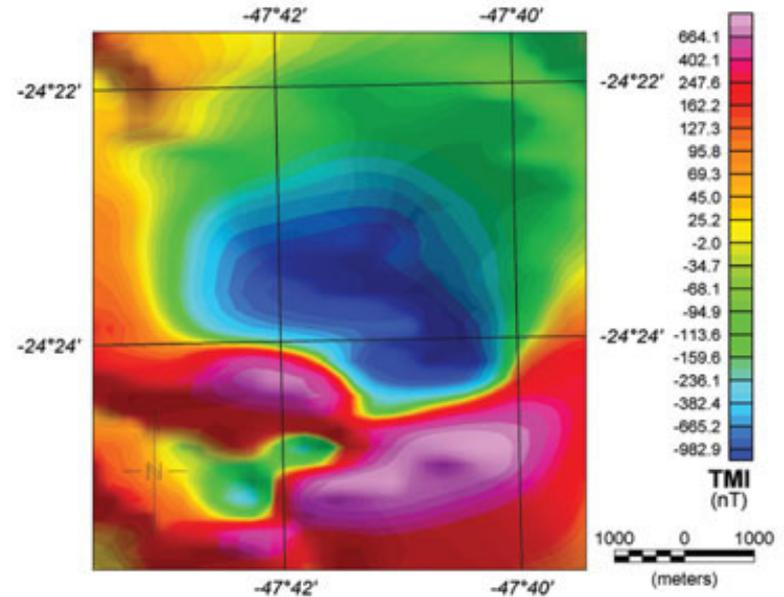
REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS

- Los datos se pueden representar a modo de **perfiles** y como un diseño de mapa de **isolíneas**. La amplitud y forma de las **anomalías magnéticas** están compuestas en función de:
 - Magnitud y orientación del campo magnético terrestre para ese lugar geográfico.
 - La geometría del cuerpo rocoso anómalo y su orientación respecto al campo magnético terrestre.
 - La cantidad de minerales ferromagnéticos, su susceptibilidad y el contraste con las rocas adyacentes.
 - La distancia de la fuente anómala y el sensor.

REPRESENTACIÓN DE LOS DATOS



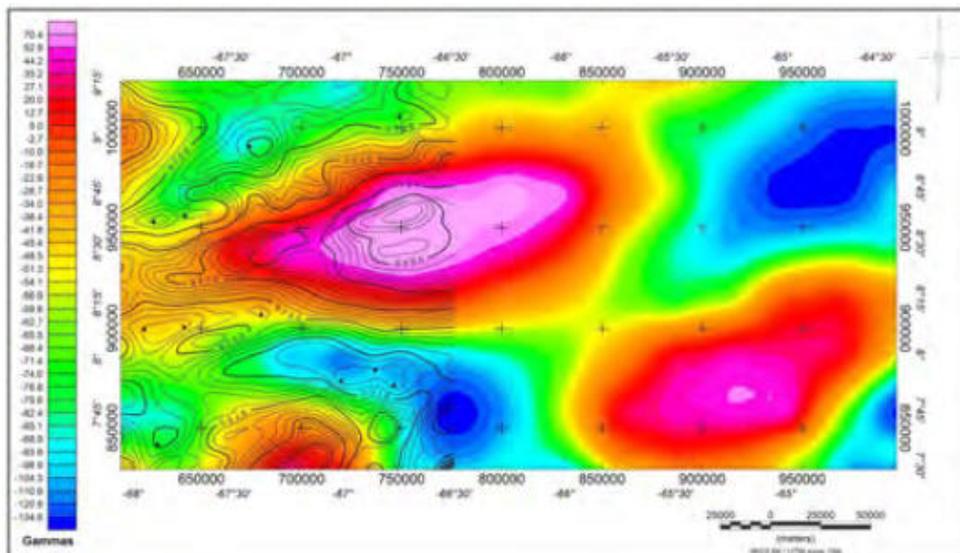
Mapa en donde se observa la localización de las secciones magnéticas terrestres. El pozo de agua que aparece al Norte del mapa es donde la población de La Dulcita se abastece con un gasto menos a 1 lt/seg. El pozo de agua que aparece al SW es un pozo con un gasto de 25 lt/seg. El Pozo Papalote resultó estéril porque se quedaron cortos en la perforación.



Campo Magnético Total do complexo alcalino de Jujuyá.

INTERPRETACIÓN DE ANOMALÍAS MAGNÉTICAS

- El **objetivo final** es la deducción de la geometría de los cuerpos magnéticos causantes de **un determinado conjunto de anomalías**.
- La existencia de numerosas distribuciones subterráneas de imanación que se pueden corresponder con las mismas series de observaciones en la superficie, hace que las **anomalías magnéticas por sí solas son insuficientes** para determinar sin ambigüedad los cuerpos o estructuras que las causan.



APLICACIONES

- La búsqueda de minerales magnéticos como **magnetita, ilmenita o pirrotina**.
- La **localización de minerales magnéticos** asociados con minerales no magnéticos, de interés económico (Au, Ag ect).
- La **determinación de las dimensiones** (tamaño, contorno, profundidad) de estructuras de zonas mineralizadas cubiertas por capas aluviales o vegetales.
- Los **depósitos de Fe asociados con rocas magmáticas** frecuentemente están caracterizados por un cociente magnetita/hematita alto y en consecuencia pueden ser detectados directamente por las mediciones magnéticas.
- Frecuentemente se emplea el **método magnético en la exploración para diamantes**, que ocurren en chimeneas volcánicas de kimberlitas o lamprófidos en los EE.UU., en la ex Unión Soviética y en Africa del Sur, Este y Oeste.

APLICACIONES

- Localización de tuberías, cables y objetos metálicos.
- Localización de minas antipersona.
- Localización de bidones metálicos conteniendo residuos tóxicos.
- Localización de pozos de mina ocultos.
- Investigaciones arqueológicas.
- Existencia de diques ígneos.
- Prospecciones de yacimientos metálicos.
- Estudios geológicos a escala regional.

Martínez Pagán (2007).

APLICACIONES

- **Prospección Petrolífera:** información sobre la profundidad de las rocas del **basamento**. Definición de la **extensión de las cuencas sedimentarias** ubicadas encima del basamento.
- Depósitos magnéticos intrasedimentarios como rocas sulvolcánicas e intrusiones emplazadas a poca profundidad que cortan la secuencia sedimentaria normal. **Contrastes entre rocas sedimentarias** (no magnéticas) **y rocas ígneas** (con min. magnéticos).
- **Aeromagnetismo:** información sobre zonas de fallas, de cizallamiento y de fracturas.
- Las anomalías magnéticas se pueden determinar hasta una **profundidad máxima de 30 a 40 km**.



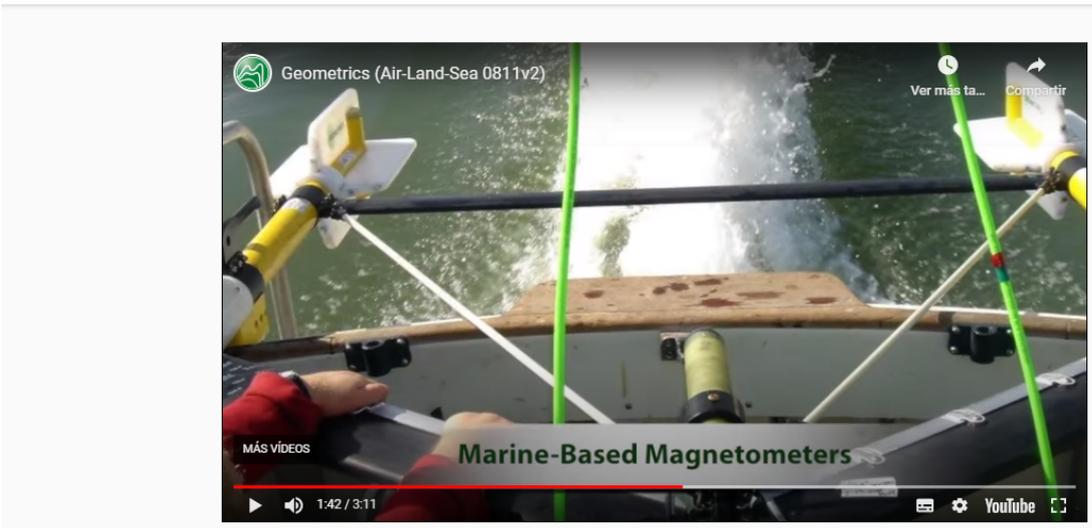
G-882 Marine Magnetometer.
The best Selling Magnetometer
in the World. Period.



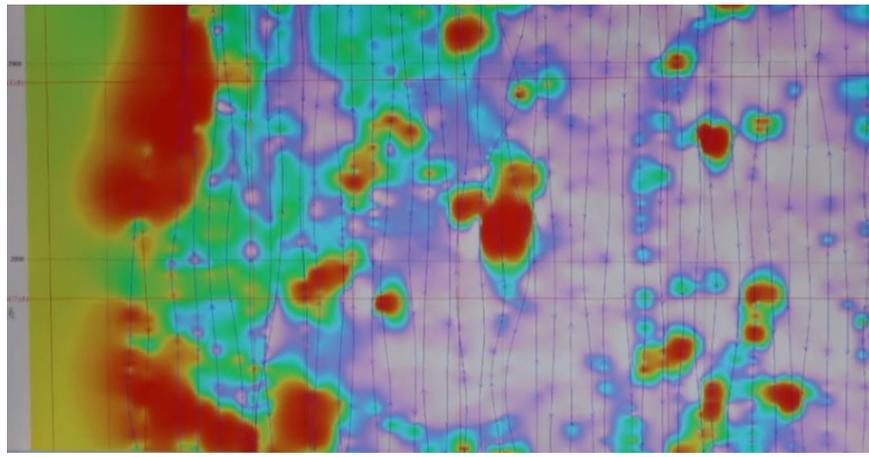
G-864 Magnetómetro de Cesio.
Lleva incorporado una tablet Android.



PRODUCTS RENTALS SOLUTIONS SOFTWARE RESOURCES SUPPORT



G-882 Marine Magnetometer.
The best Selling Magnetometer
in the World. Period.



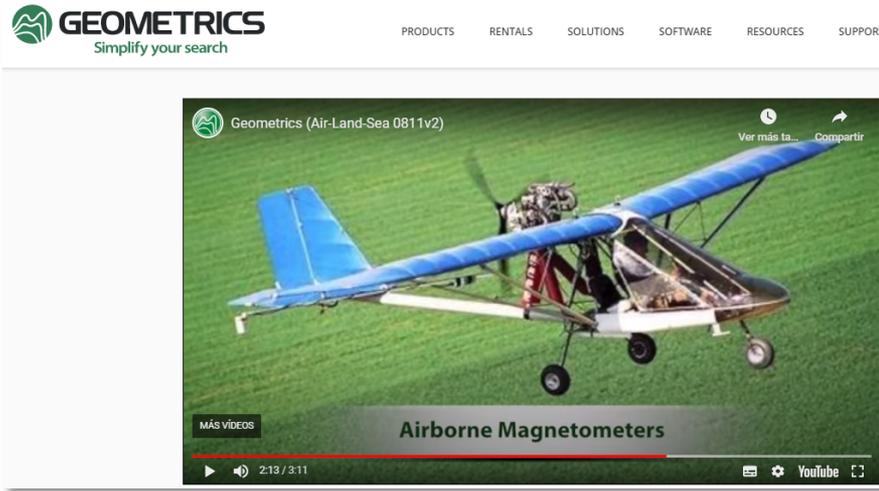
AEROMAGNETISMO CON DRON



<https://www.geometrics.com/>



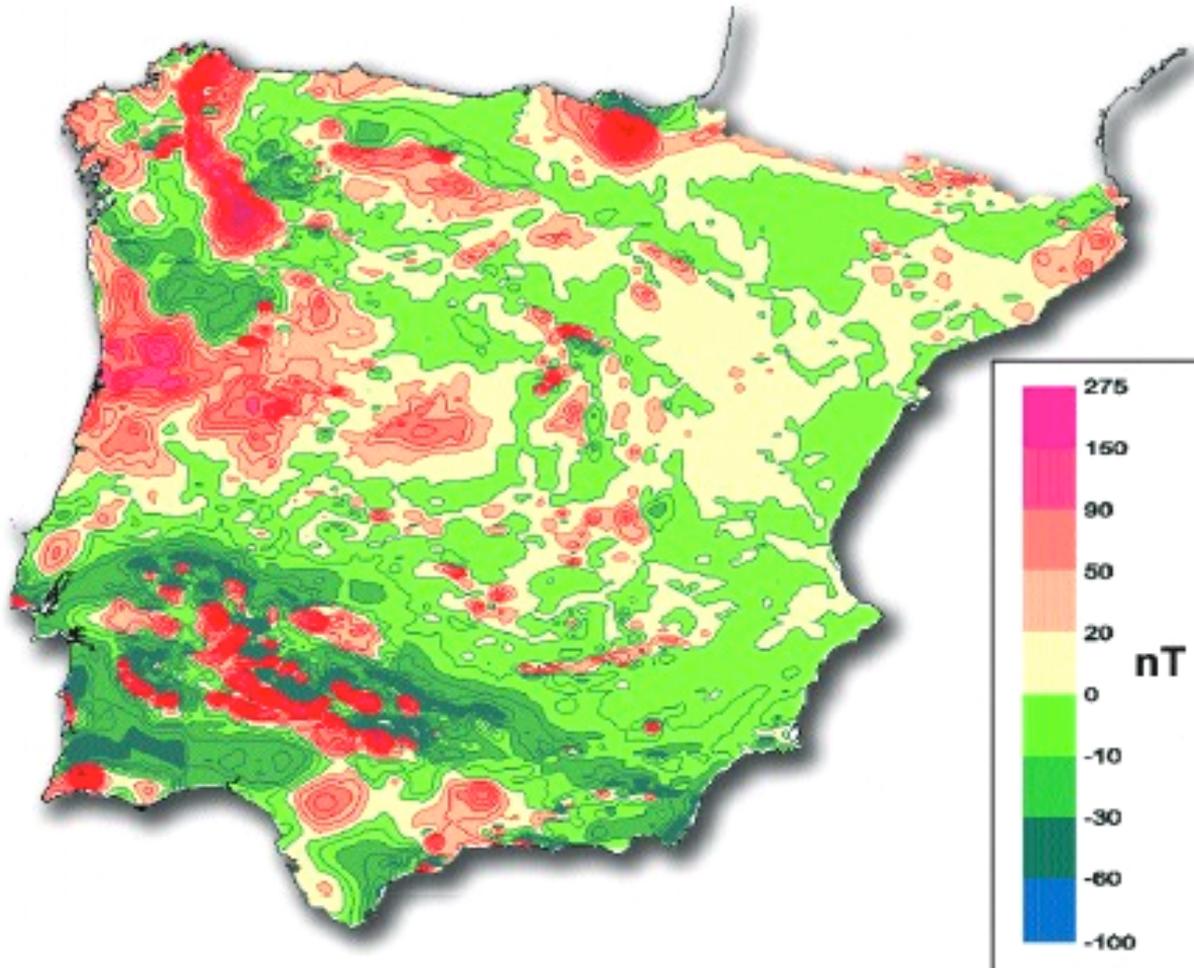
MAGNETOMETRÍA AEROTRANSPORTADA



EL NIVEL CERO

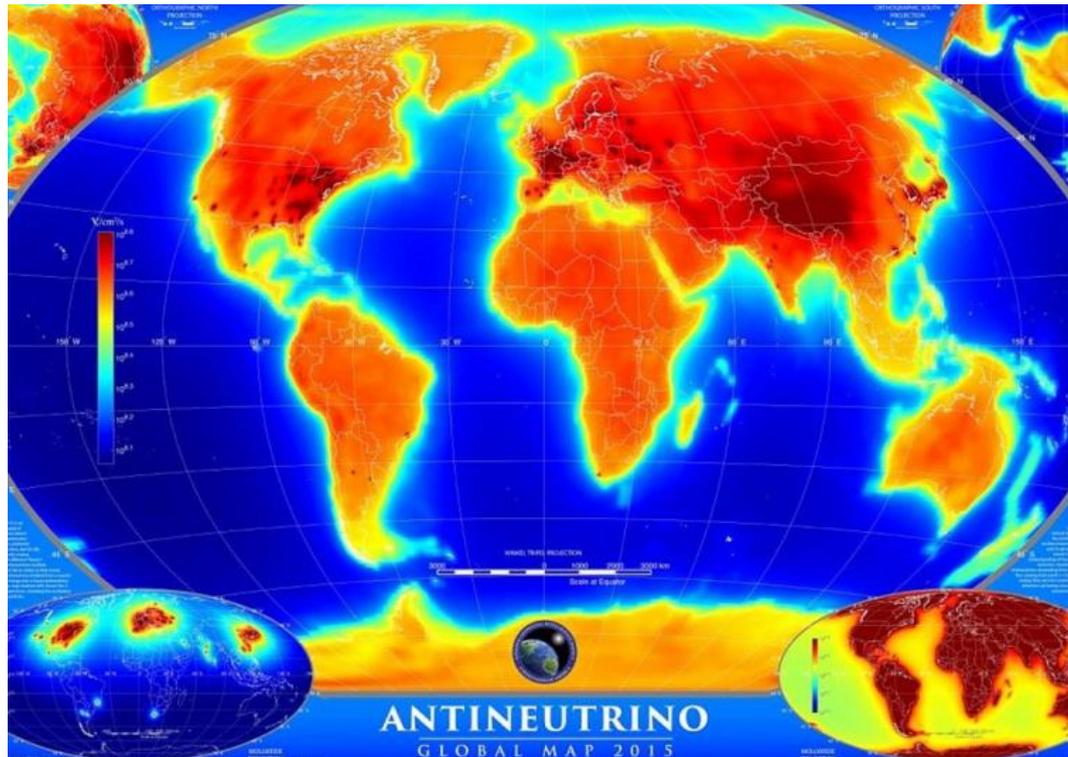
- **Nivel cero** (campo normal): **lectura del magnetómetro** en los puntos en que **no existen perturbaciones** apreciables producidas por cuerpos subterráneos.
- Generalmente no es posible escoger inicialmente un nivel de cero absoluto, por lo que se utiliza un “**cero de trabajo**”, y al terminar la campaña se corrigen todas las lecturas añadiendo o sustrayendo una cantidad constante deducida del estudio de las anomalías obtenidas.
- Si las lecturas permanecen constantes sobre una parte grande de la zona investigada, o varían irregularmente dentro de ella, sugiriendo la sola presencia de un efecto de fondo, la lectura media del instrumento en esta parte puede considerarse como cero. Las lecturas en todas las demás **estaciones** se expresan como **desviaciones positivas o negativas respecto de este cero**.

MAPA AEROMAGNÉTICO DE ESPAÑA PENINSULAR



([J. Ardizzone, J. Mezcua e I. Socias, 1989](#)).

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

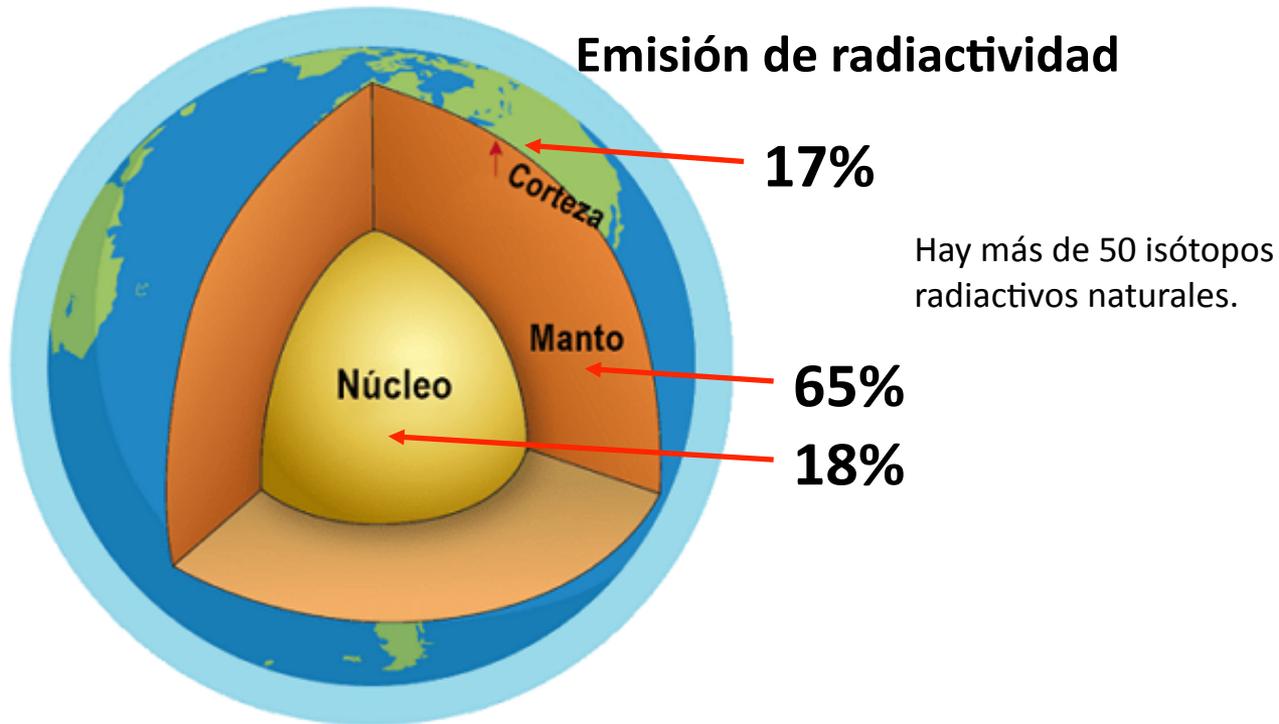


MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- Se basan en las leyes que rigen la desintegración y comportamiento de los elementos radiactivos.
- Intentan localizar y definir zonas de alteración asociada a yacimientos minerales o cuerpos sepultados en el subsuelo.
- Estos yacimientos o cuerpos, emiten pequeñas variaciones de la Radiación Gamma que tienen un potencial alto de ser explotados para fines económicos.

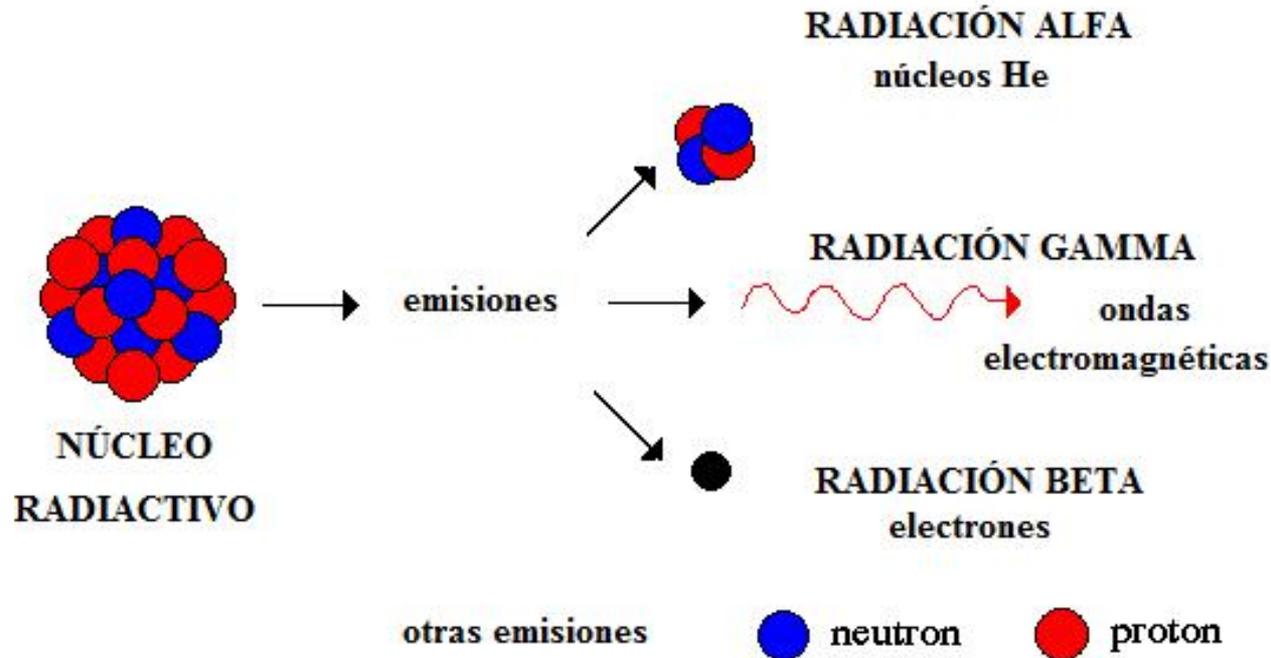
PROSPECCIÓN

- El método consiste en medir la emisión natural de radiación gamma para determinar concentraciones de elementos radioactivos en las rocas superficiales.



MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- **“Radiactividad”** es la facultad que poseen los núcleos de los átomos de algunos elementos de emitir radiaciones α (núcleos de helio), β (electrones), γ (rayos X de muy corta longitud de onda y gran energía), provocando una desintegración continua hasta llegar a un átomo estable.



MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- La desintegración de cada sustancia tiene características específicas en función del número de átomos que se desintegran por segundo.
- La radiactividad natural se utiliza en la prospección minera principalmente en elementos: U y Th, además de otros isótopos radiactivos como los de K, Rb y los elementos de las tierras raras, Sm y Lu.



Uranium mineralization visible below surface at Santa Barbara.

RADIATIVIDAD EN LAS ROCAS

- Las rocas ígneas (granito, pegmatita, riolita, toba volcánica, etc.), a menudo contienen elementos radiactivos distribuidos dentro de partículas cristalinas muy finas.
- A veces, los depósitos de rocas formadas por acumulación de sedimentos o sedimentarias (conglomerados, arcillas, areniscas, esquistos arcillosos, calizas, etc.), al ser porosas y permeables alojan bien minerales de U y Th dando lugar a yacimientos importantes de minerales radiactivos.



RADIATIVIDAD EN LAS ROCAS

- Las rocas metamórficas (mármol, cuarcita, esquistos metamórficos, gneis, pizarra, etc.), tienden a mantener el contenido de minerales radiactivos de las rocas originarias.



- Los depósitos de fosfatos (roca sedimentaria compuesta por minerales del grupo del apatito) y carbón (hidrocarburos) tienen una consideración especial ya que tanto los fosfatos como los hidrocarburos alojan muy bien los enormes cationes de U y Th, por lo que en algunos casos estos depósitos contienen altas concentraciones de uranio.
- **La concentración de elementos radiactivos en rocas es:**
 - Frecuente en granito, pizarra, esquisto, carbón, depósitos de fosfatos.
 - Ocasional en andesita, conglomerados, arenisca, gneis.
 - Rara en basalto, caliza, depósitos de yeso y sales, cuarcitas, mármol.

RADIATIVIDAD EN LOS MINERALES

- En cuanto a los minerales, en la Naturaleza hay cientos con isótopos radiactivos. Entre los más representativos que contienen potasio, uranio y torio (además de sus productos de desintegración) encontramos:
 - **Potasio (K):** silvina (KCl) utilizada en fertilizantes y micas (moscovita, biotita, lepidolita, flogopita), utilizadas en la industria de aislantes térmicos y eléctricos.
 - **Uranio (U):** autunita, carnotita, pechblenda, torbernita, uraninita utilizadas como menas de uranio para la industria energética y metalúrgica.

Silvina



Moscovita



Uraninita



Autunita



Tobernita

RADIATIVIDAD EN LOS MINERALES

- **Torio (Th):** monacita, torianita, torita utilizadas como menas de torio y tierras raras para la industria metalúrgica y electrónica.

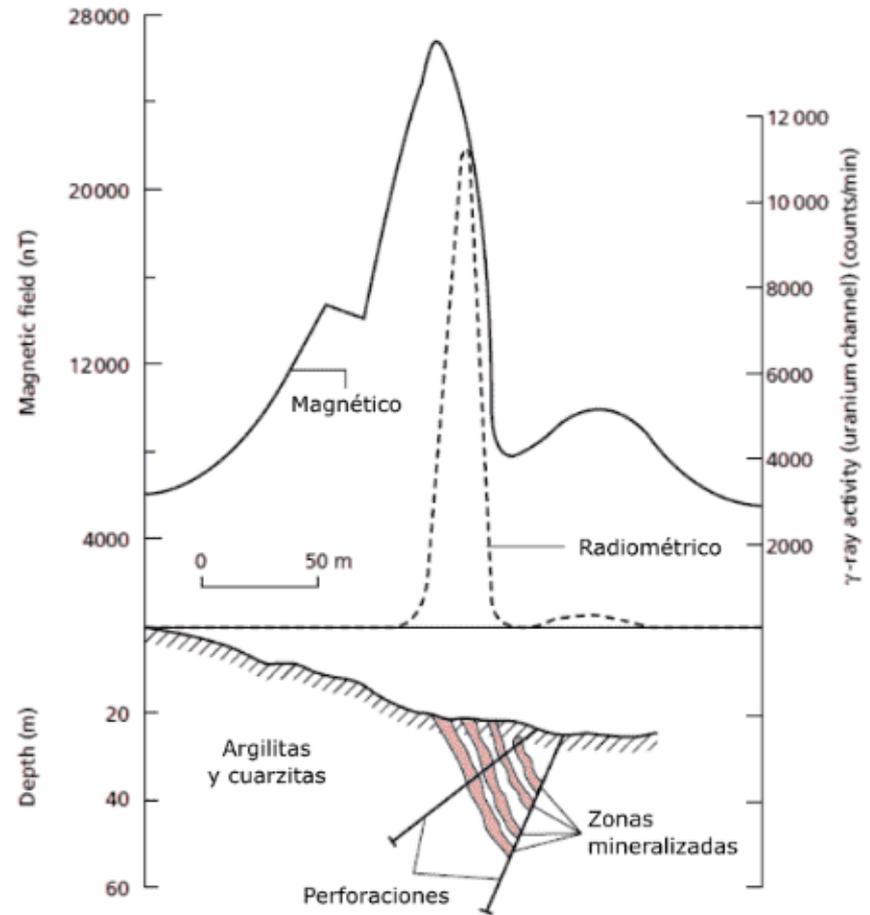


Monacita



Torianita

- La Figura muestra un perfil magnético de suelo y radiación gamma en una zona de mineralización de uranio en Labrador.



Perfiles radiométricos y magnéticos sobre mineralización de pitchblenda-magnetita en Labrador.

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

APLICACIONES

- La presencia de sustancias radioactivas en las rocas puede ser utilizada en la búsqueda de yacimientos minerales de los elementos radioactivos como **uranio, torio y potasio**, además se usa para detectar minerales de interés económico asociados con dichos elementos.
- La búsqueda de **uranio** ha sido el **objetivo principal de la prospección radioactiva** ya que el **uranio es el combustible principal para la energía atómica**. El torio a su vez es un combustible nuclear potencial, pero en la actualidad no hay demanda del mismo para esta finalidad.
- El hecho de que las distintas rocas contengan diferentes cantidades de elementos radioactivos permite que el método radioactivo se pueda usar en cartografía geológica.



Visible surface uranium mineralization at Santa Barbara.



Scintillometer reading.



Santa Barbara visible uranium sample hole.

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- Las **tres radiaciones emitidas** por los núcleos radiactivos pierden parte de su energía al atravesar la materia, pero en grado diferente:
 - Las partículas α y β tienen escaso grado de penetración y son completamente detenidas por el recubrimiento más ligero, arcillas, humus, etc.
 - Las partículas γ tienen mayor alcance y son las que se utilizan en minería.
- Como se ha visto las rocas presentan **trazas de elementos radiactivos**, por lo que los métodos radiométricos solo son aplicables si las distintas litologías, estratos o facies tienen **radiactividades diferentes**.

VALORES MEDIOS DE CONTENIDOS EN POTASIO, TORIO Y URANIO

	Potasio (%)	Torio (ppm)	Uranio (ppm)
Rocas basálticas	0,8	4	1
Rocas graníticas	3	12	3
Areniscas	1,1	1,7	0,5
Rocas arcillosas	2,7	12	3,7
Rocas carbonatadas	0,3	1,7	2,2

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- Exploración de elementos radioactivos (U, Th, K).
- Método muy económico.

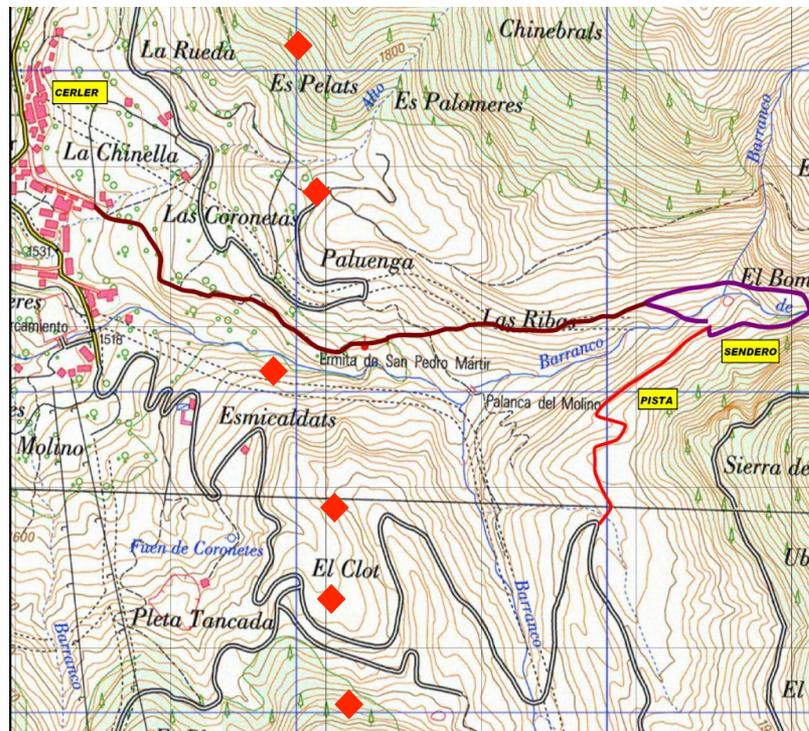


TRABAJO DE CAMPO

- **Tipos de prospección:** regional o detalle.
- Va a depender del tamaño de la zona a prospectar, del tamaño del objetivo buscado y del detalle requerido.
- **Opciones:**
 - Itinerarios o en una malla.
 - Registro continuo o puntual.
 - Tiempo de muestreo.
 - Distancia del detector.

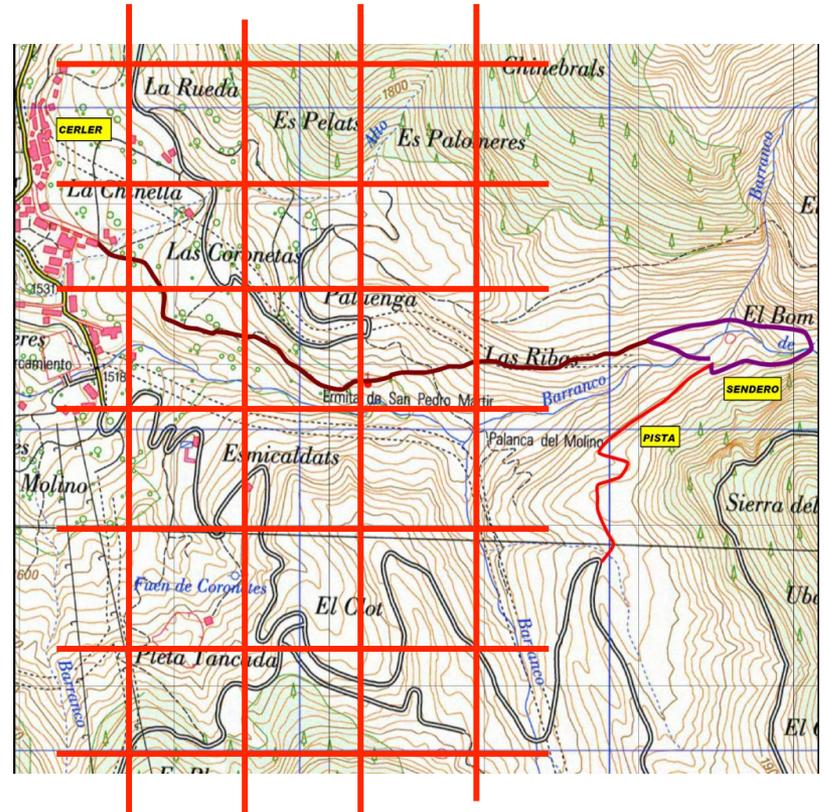
PROSPECCIÓN REGIONAL

- **Itinerarios aleatorios:** 3 a 300 m.
- **Registro continuo.**
- **Tiempo de muestreo:** 1 segundo.
- **Escintilómetro.**
- **Distancia sobre el terreno:** 1-1,5 m.



PROSPECCIÓN DE DETALLE

- **Malla regular:** de 3 a 10 m.
- **Registro:** estación por estación.
- **Tiempo:** 10 segundos.
- **Directamente sobre el terreno.**



MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- **La prospección radiactiva utiliza dos tipos de instrumentos:**
 - El contador de Geiger.
 - El escintilómetro o destellómetro.
- Ambos contruidos para determinar la radiación γ .



Escintilómetro



Contador Geiger

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

FUNCIONAMIENTO

- **Las mediciones radiométricas se pueden efectuar mediante prospección aérea o terrestre:**
 - En **exploración aérea** se utiliza un **espectrómetro de rayos Gamma** Radiations Solutions Inc. RS500, con un **muestreo de 1 lectura cada 1 segundo**.
 - En **exploración terrestre** se puede utilizar un espectrómetro de mano Radiations Solutions Inc. RS-230 BGO.
 - Este espectrómetro permite realizar mediciones de Torio, Potasio y Uranio, calculadas internamente a partir de espectros de rayos Gamma registrados a lo largo de un período mínimo de 30 segundos.



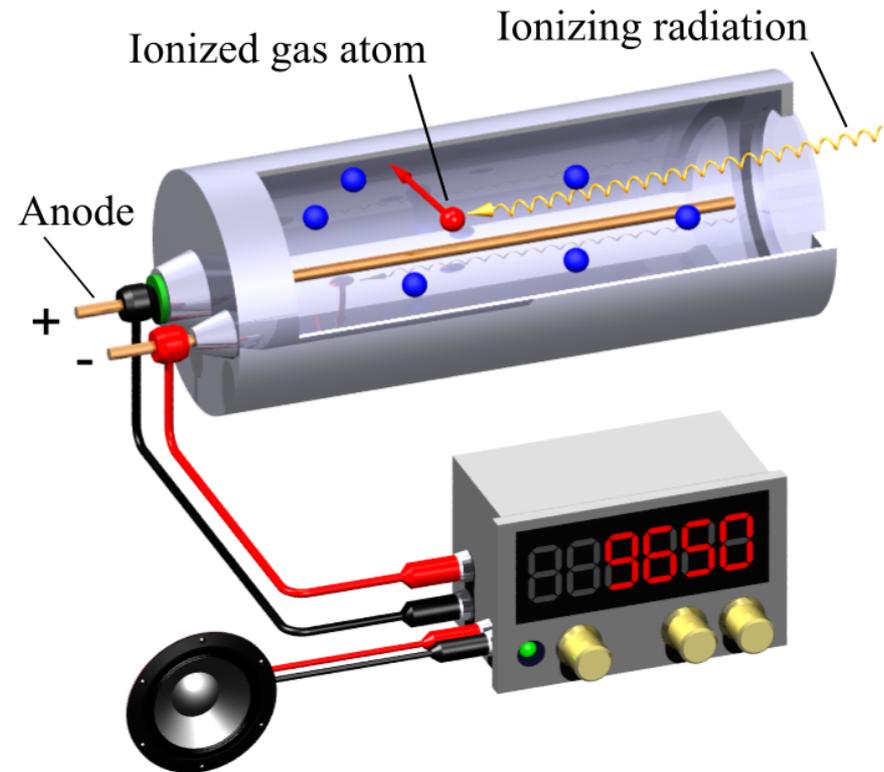
EL CONTADOR DE GEIGER

- Desarrollado en 1928 por los alemanes Hans Geiger y Walther Müller a partir de la cámara de ionización, pero, a diferencia de ésta, opera con tensiones más altas, de entre 800 y 1000V (siguiente gráfico de la derecha).
- **Asegura respuestas en presencia de niveles bajos de radiación.**



EL CONTADOR DE GEIGER

- Tiene una entrada de radiaciones al tubo, las cuales colisionan con los átomos del gas allí contenido (metano y argón). Esto genera la expulsión de electrones en avalancha, que son registrados como una sola pulsación, independientemente de la cantidad de energía inicial de la radiación.



EL ESCINTILÓMETRO O DESTELLÓMETRO

- Instrumento que detecta y mide la radiación ionizante, contando los destellos de luz producidos por la radiación al incidir sobre un escintilador.
- Inventado por el irlandés Samuel Curran en 1944 como parte del Proyecto Manhattan.
- Posee un fotocátodo, un tubo fotomultiplicador, una cámara de destellos y un registrador electrónico.



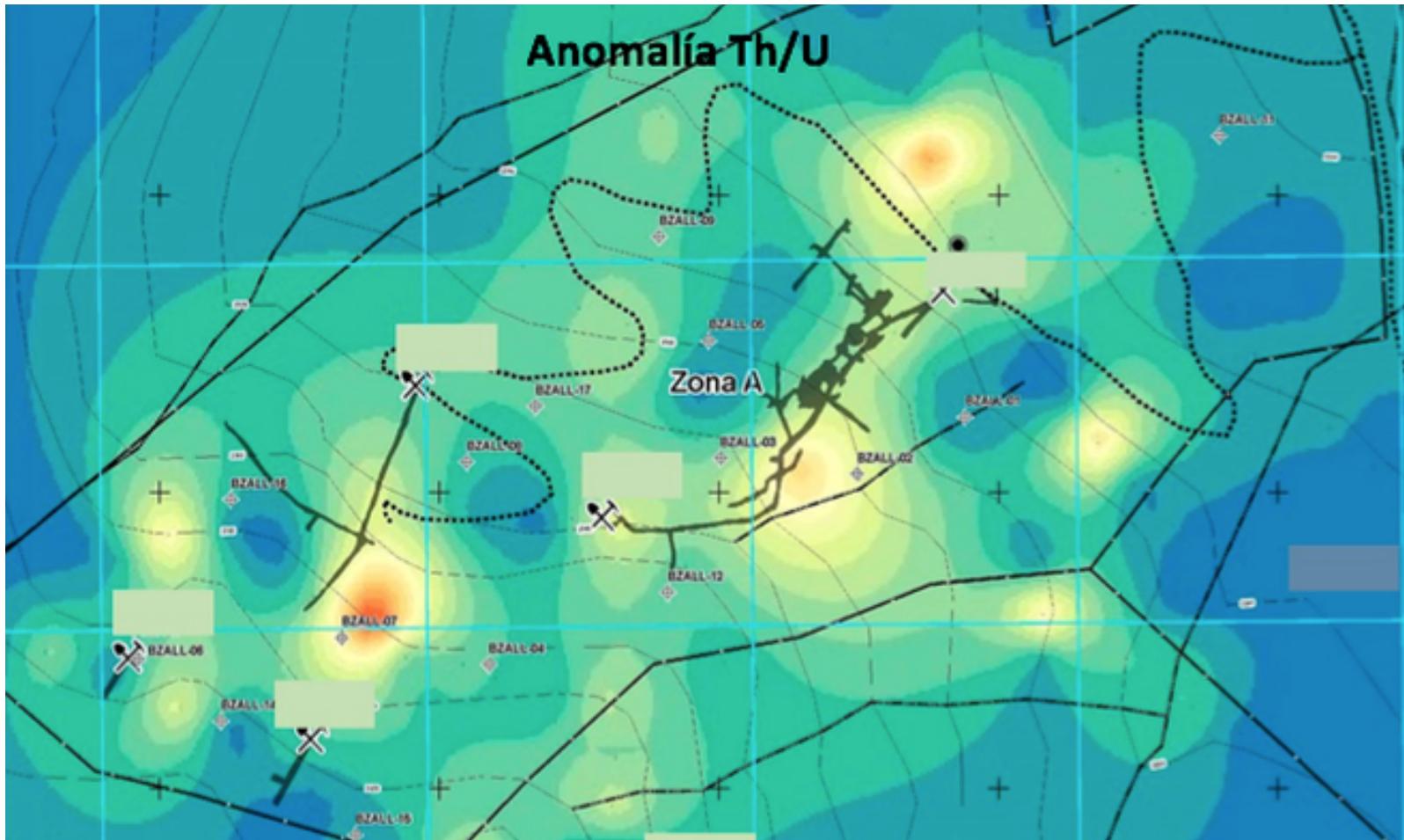
MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

- Se diferencia del **contador geiger** en que es mucho más sensible y preciso.
- El **contador geiger** es un tubo metálico cerrado con gas a baja presión, el gas y el metal del tubo actúan como electrodos, de manera que cuando la radiación ioniza el gas del interior al atravesarlo, se forma una corriente eléctrica medible entre los electrodos. **Detecta radiaciones alfa, beta y gamma como un bloque, sin diferenciarlas entre ellas.**
- El **Escintilómetro** lo que se usa es un **crystal de yoduro de sodio con talio**, que tiene la particularidad de emitir luz cuando una partícula radiactiva lo atraviesa. Esta luz se transforma en energía eléctrica medible mediante una fotocélula.
- Tiene varias ventajas respecto al **contador geiger**:
 - Es capaz de medir también los rayos X.
 - Mayor sensibilidad.
 - No solo detecta las partículas, también el espectro de las mismas (es decir, nos indica cuales son alfa, cuales son beta, gamma, rayos X...).
 - Cuanto mayor sea el tamaño del cristal que contiene, mayor será su sensibilidad y precisión.

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

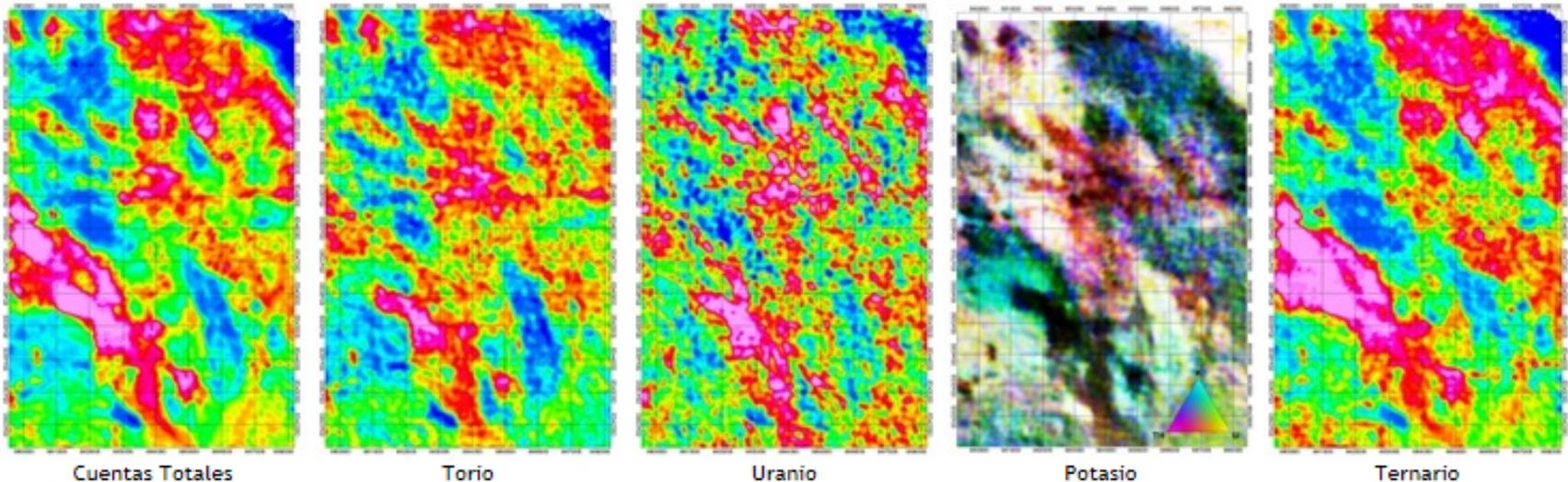
- La **prospección terrestre** de radiactividad se realiza midiendo **perfiles**.
- Si existen pruebas de la existencia de radiactividad en la zona, se efectúan mediciones de detalle sobre estaciones en malla apretada, de 5 a 10 m. de lado.
- A causa de la presencia de rayos γ en la radiación cósmica en la atmósfera existe radiactividad provocando un **ruido de fondo** que debe determinarse en cada zona y restarse de las lecturas.
- Las anomalías no son consideradas significativas a menos que sean **dobles o triples que el fondo**.
- La interpretación de prospecciones radiactivas se hace trazando **mapas de isoradiactividades**. Su interpretación, como todos los métodos geofísicos, se hace teniendo en cuenta la geología y topografía locales.

MÉTODOS RADIOMÉTRICOS

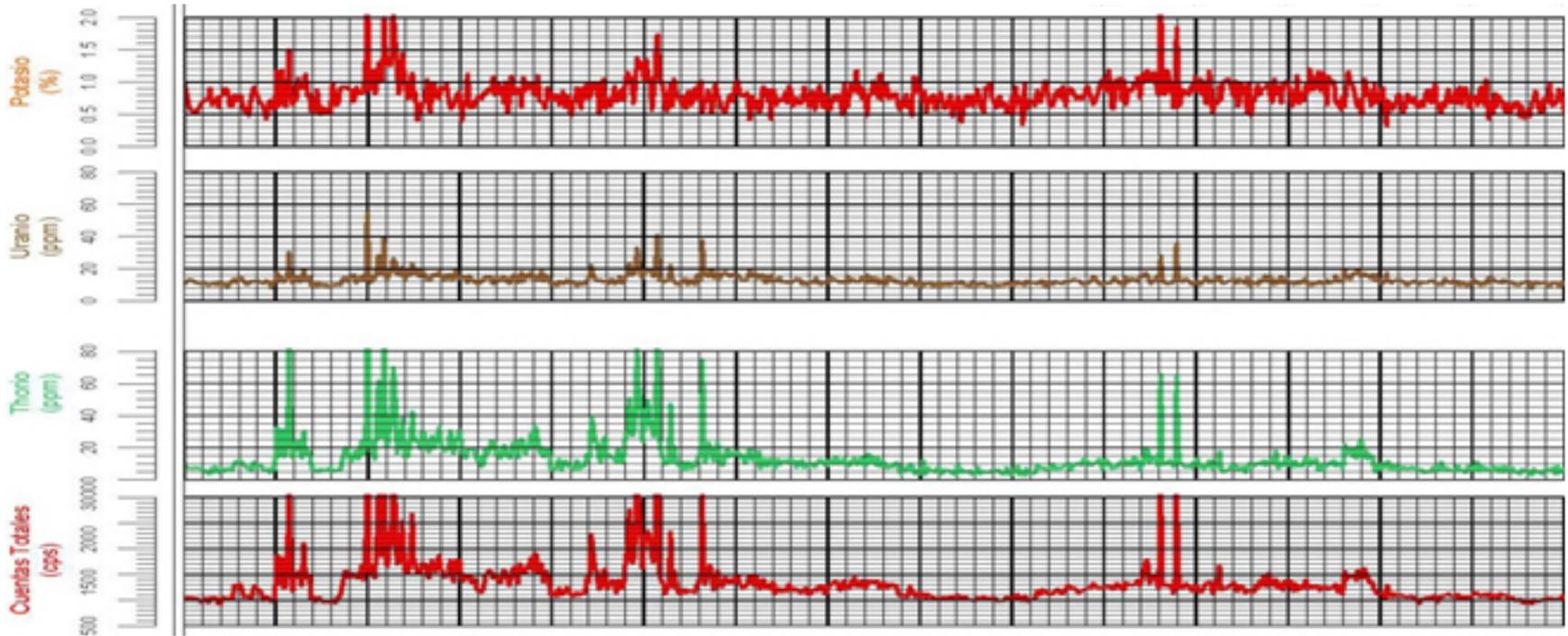


MÉTODOS RADIOMÉTRICOS**RESULTADOS**

- La radiometría **proporciona información sobre los contenidos superficiales de los isótopos radioactivos naturales del ^{40}K , ^{235}U , ^{238}U y ^{232}Th** , suministrando una imagen del terreno de alta calidad y correlación con la cartografía geológica.
- Mediante un software específico se hace la reducción de los datos. Los resultados son mapas con las concentraciones de porcentaje de Potasio, ppm de Uranio y Torio.



MÉTODOS RADIOMÉTRICOS



Radiometría de perfiles con espectrómetro de mano.

VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MÉTODO RADIOMÉTRICO

- Método selectivo.
- Fácil de aplicar y barato.
- Lo puede realizar una persona.
- La interpretación debe ser muy cuidadosa.
- Los resultados son relativos.
- El mantenimiento del equipo es costoso.