



CCMASTERS
EDUCATION®

Curso de Desarrollo de proyectos geofísicos con Python y GIT

**Juan Camilo Mejía Fragoso, Geólogo
Esp. en Geología Minera
Candidato a Magister en Geofísica**



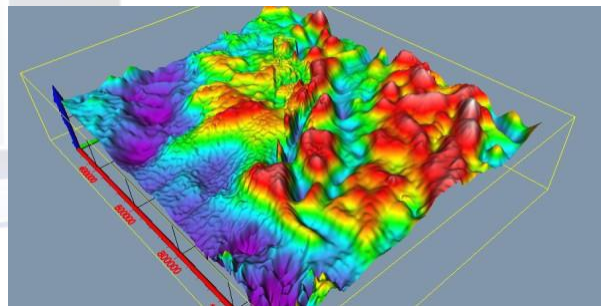
Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



**CCMASTERS
EDUCATION®**

Módulo 1

Fundamentos y conceptos básicos

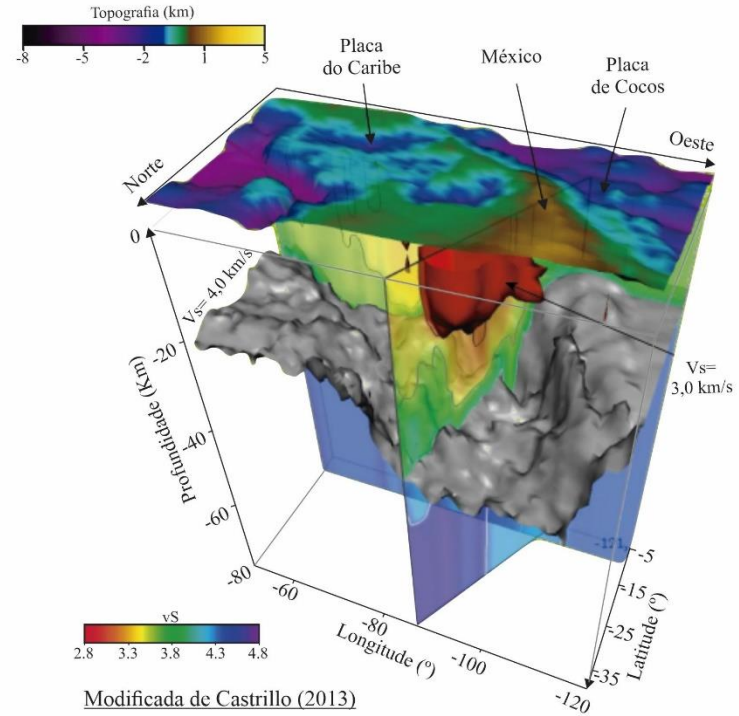


Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



CCMASTERS
EDUCATION®

Introducción a los métodos geofísicos



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com

¿Qué es?

- Es la ciencia que estudia los fenómenos físicos del planeta.
- Estudia y mide la Tierra de forma indirecta.

¿Para qué sirve?

- Geofísica pura: Evolución y las características del planeta.
- Geofísica aplicada: Prospección y exploración de recursos.

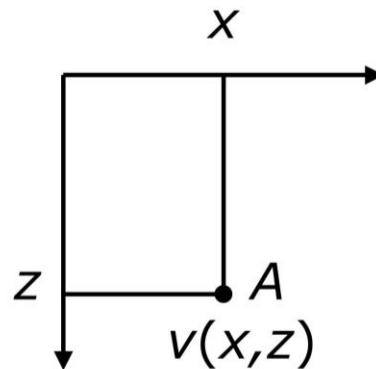
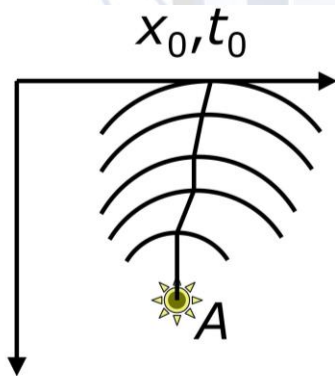
¿Qué mide?

- Campos potenciales: gravedad, magnetismo, radioactividad.
- Campos inducidos: electricidad, sísmica.



Problema inverso

- Conjunto de métodos usados para **extraer información a partir de medidas físicas o datos**
- Valores numéricos de alguna propiedad física intrínseca del entorno
- Se presupone que hay algún método específico que relaciona los parámetros con los datos
- Problema directo: **predecir los datos a partir de un modelo y los parámetros**
- Problema inverso: **predecir el modelo a partir de los datos y los parámetros**





Prospección geofísica

- Detectar, localizar cuerpos y estructuras geológicas del subsuelo, determinar sus dimensiones y propiedades físicas.
- Se mide sobre la superficie, de forma aérea o, en algunos casos, en pozos a determinada profundidad en el subsuelo.
- La elección del método depende de las propiedades físicas inferidas y del target o lo que se quiera encontrar.

**Propiedades más
comunes**

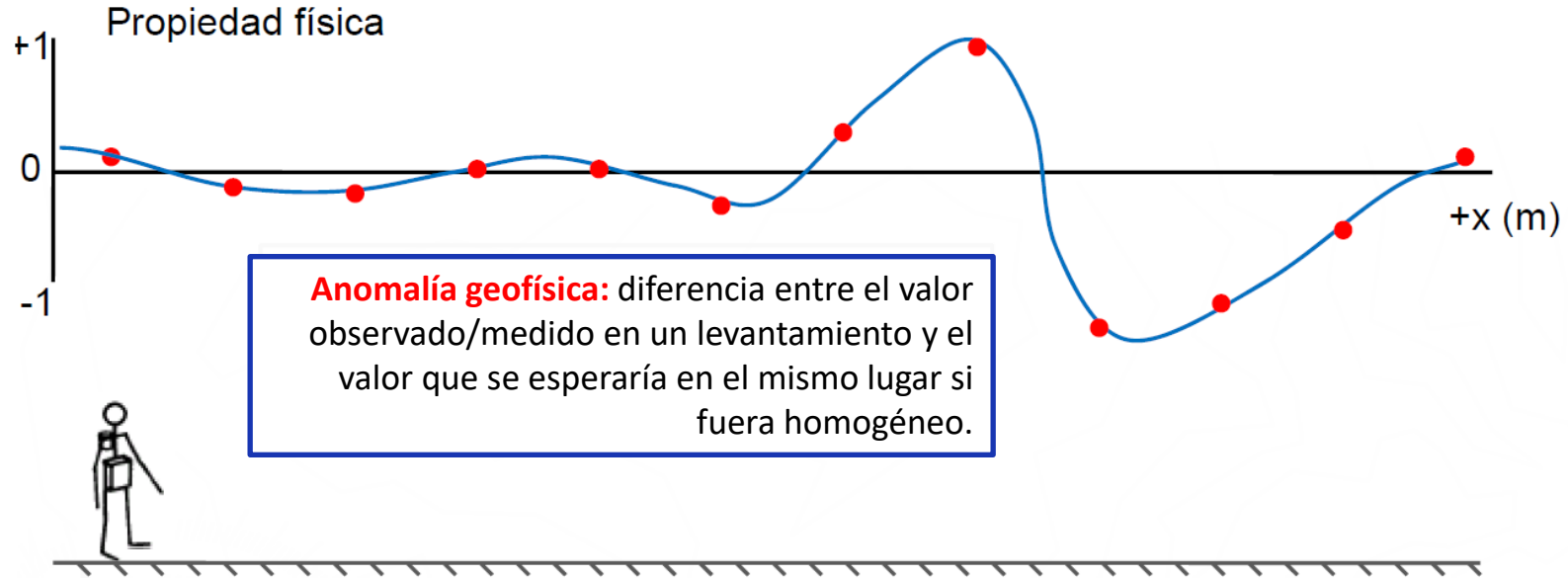
Densidad

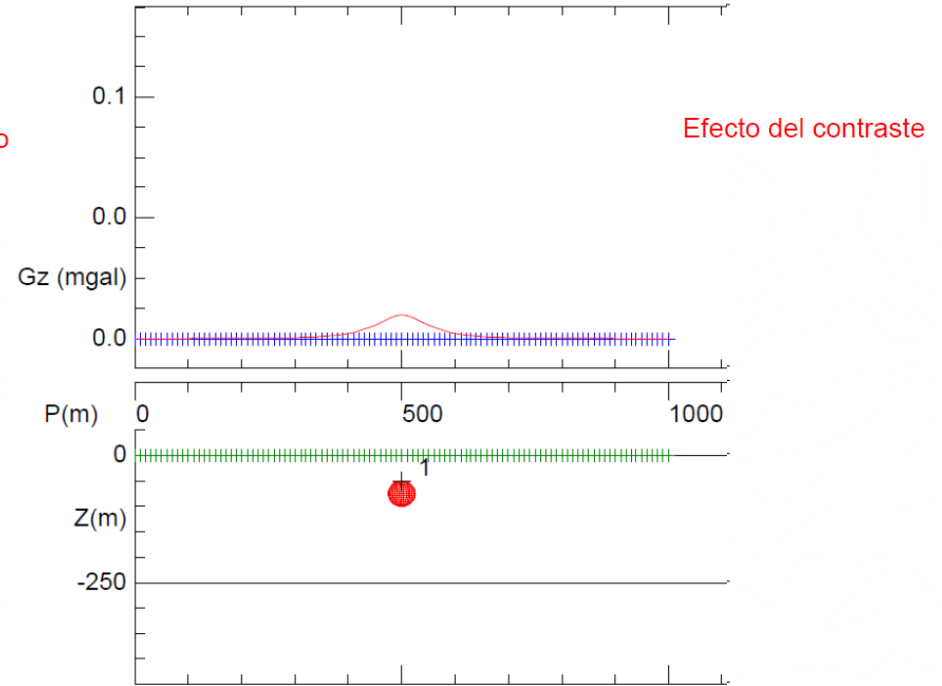
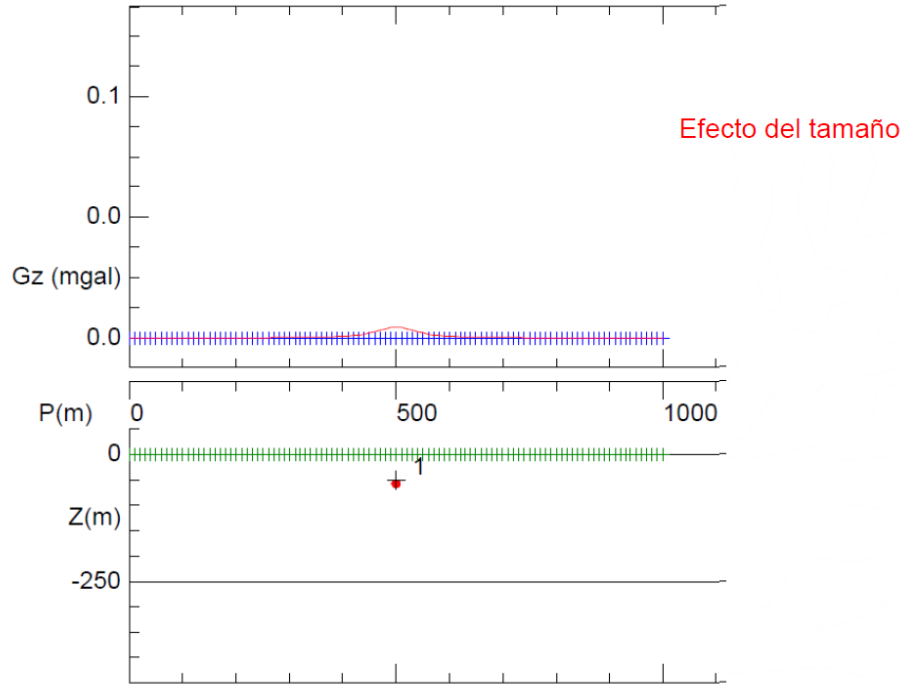
Susceptibilidad

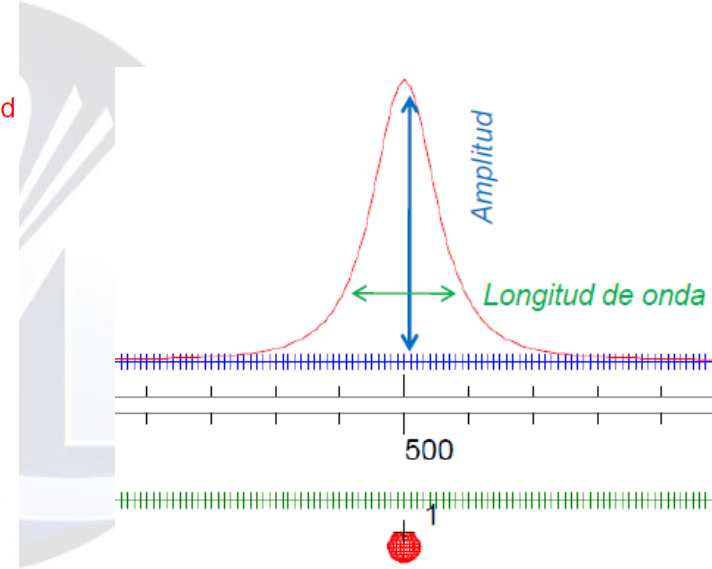
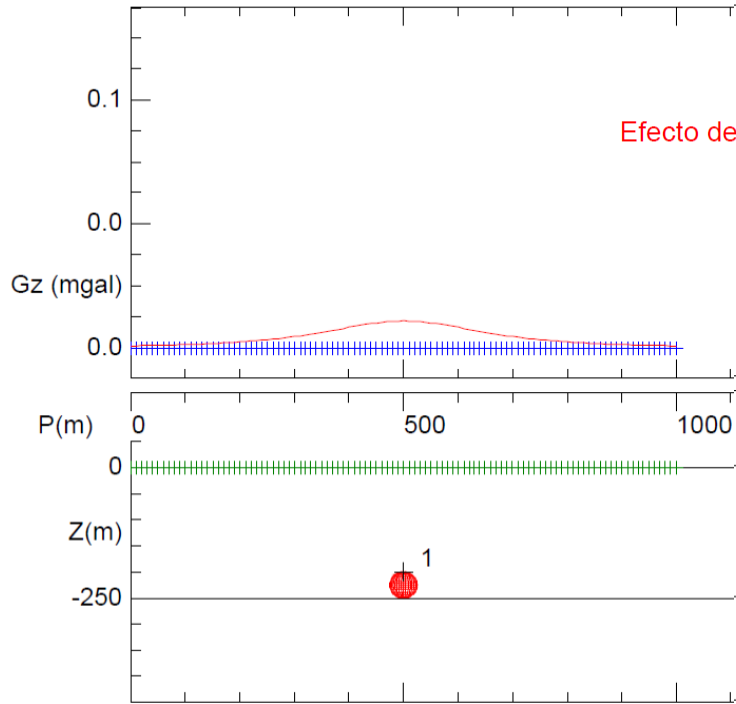
Conductividad eléctrica

Impedancia acústica



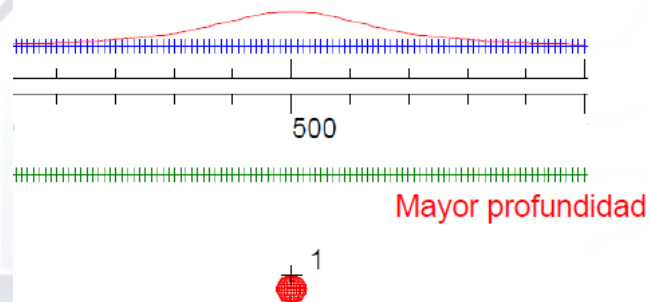
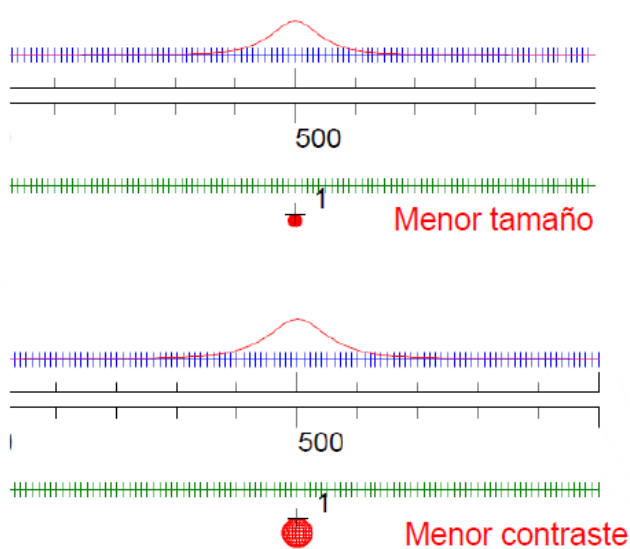




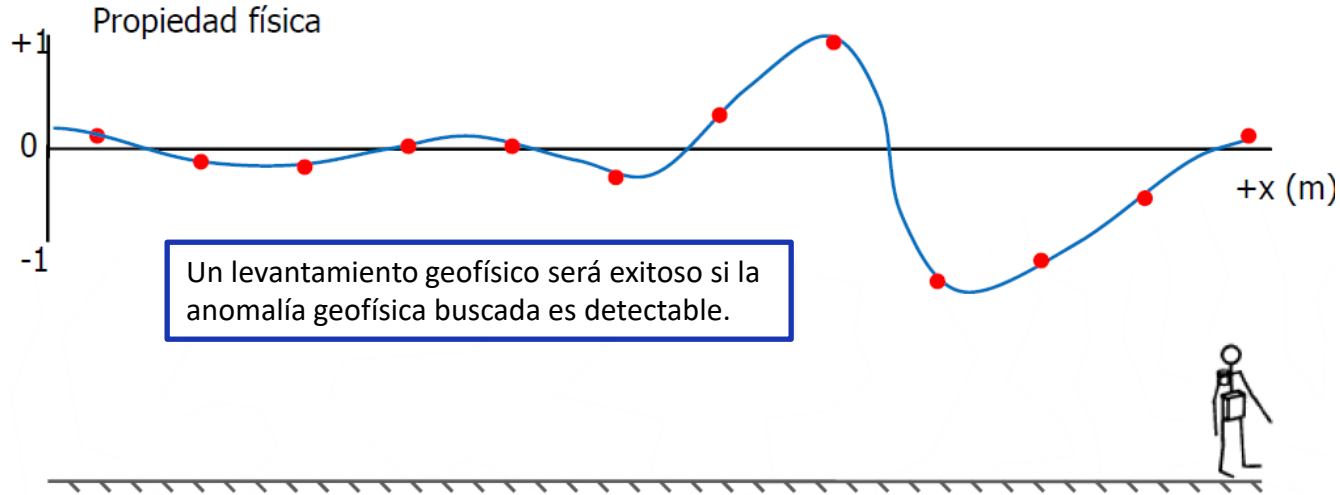




CCMASTERS
EDUCATION®



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



La detectabilidad es mayor cuando la fuente:

- Tiene mayor contraste con el medio
- Tiene mayor tamaño
- Se encuentra a menor profundidad





Propiedad física

Densidad	Magnetización	Resistividad	Polarización	Radiación gamma
↕	↕	↕	↕	↕
Gravimétrico	Magnético	Eléctrico, TEM, magnetoteléurico	Polarización inducida	Radimétrico

Método de prospección

El objetivo de los métodos geofísicos es **detectar cambios en el subsuelo**, a partir de mediciones de algún parámetro físico realizadas en la superficie.

Las variaciones en el parámetro superficial tendrán alguna relación con el **contraste** entre las propiedades físicas de





Gravimetría

Detección de anomalías en g

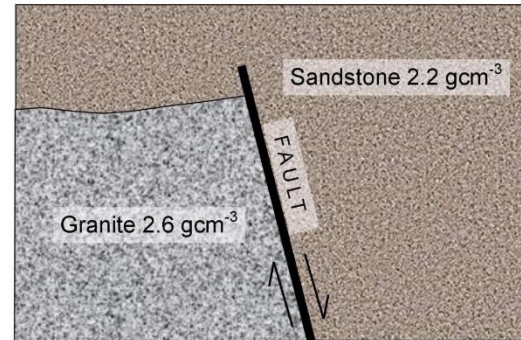
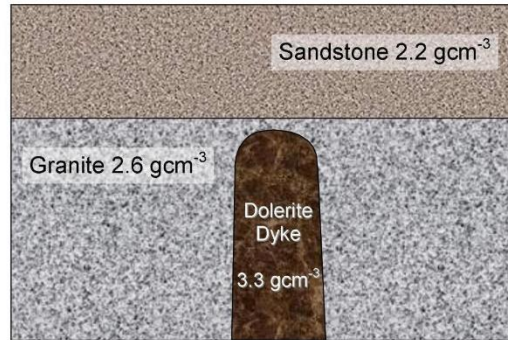
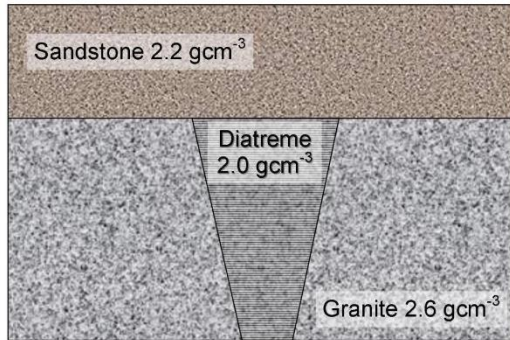
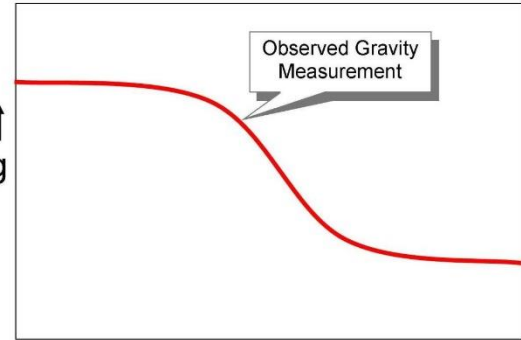
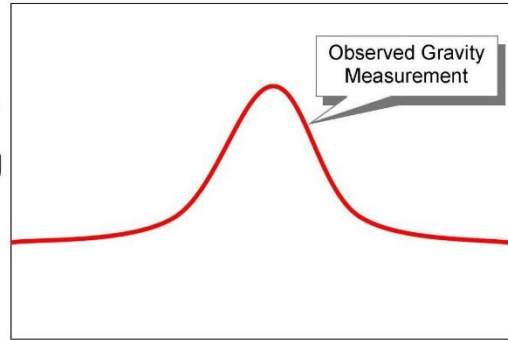
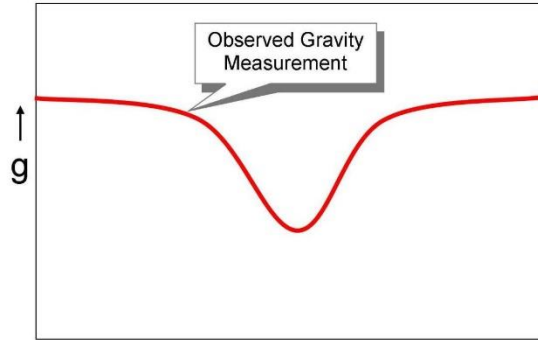
Son medidas con gravímetros

Responden a contrastes de densidad

Anomalías positivas y negativas

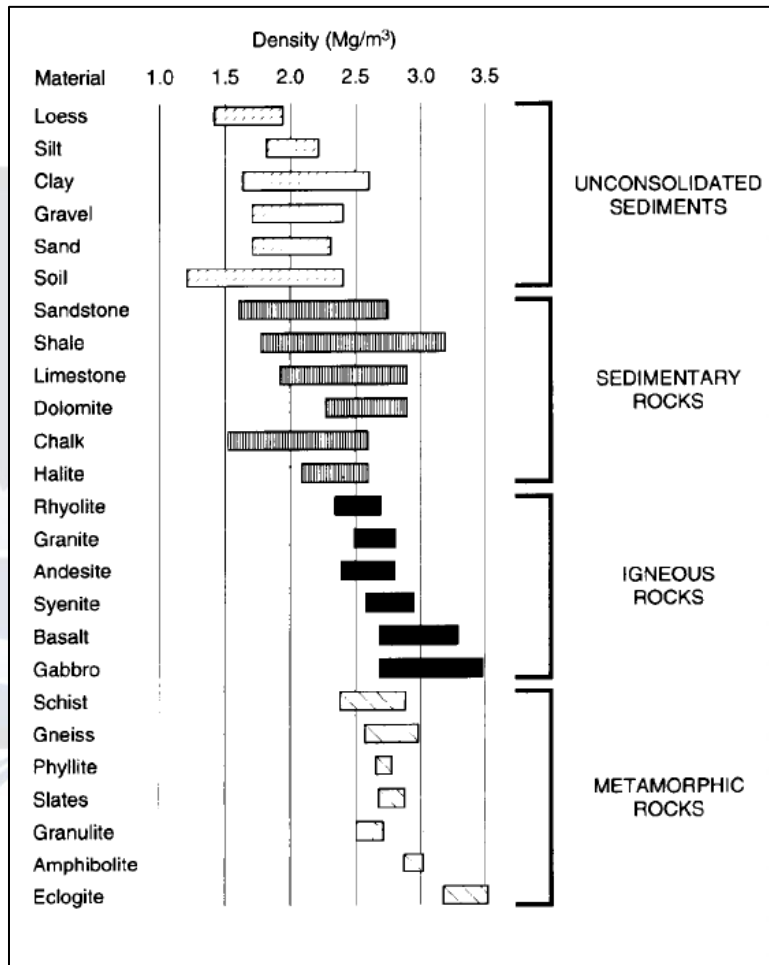
Cuerpos más densos o menos densos

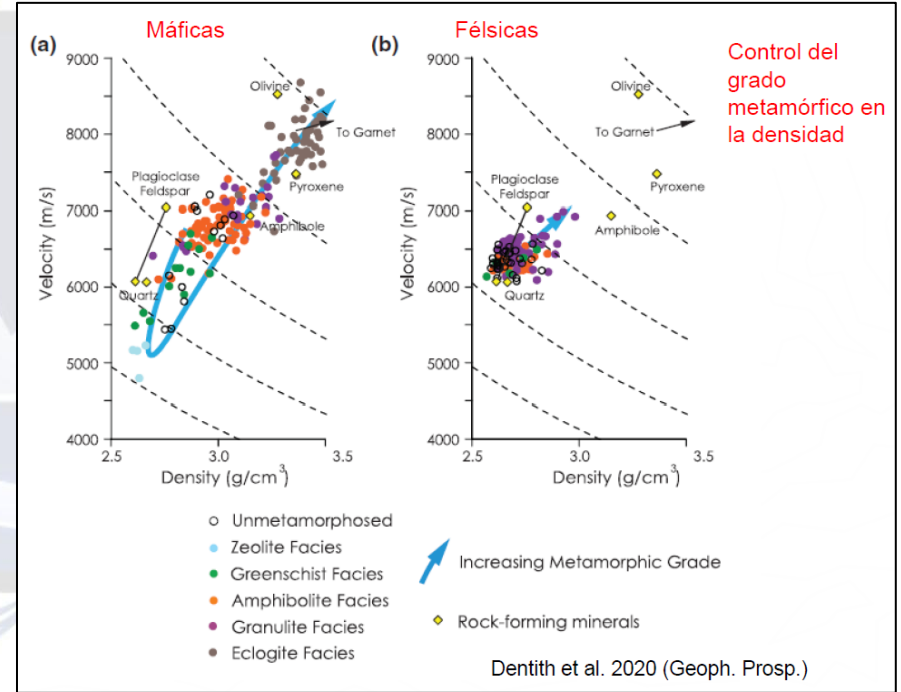
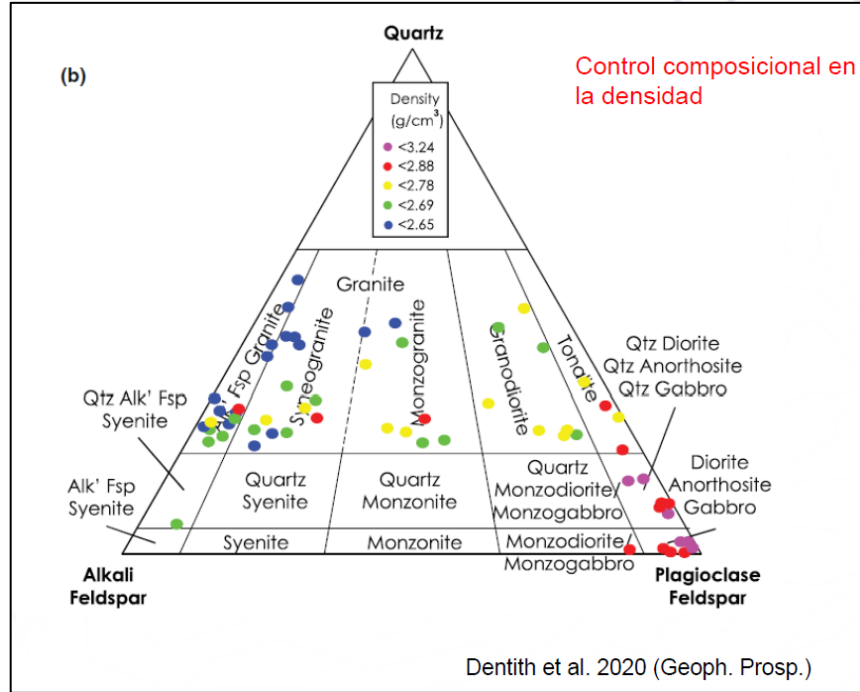






- El grado de empaquetamiento de los elementos de la roca es el primer condicionante de su densidad.
- Los sedimentos no consolidados son menos densos.
- Las rocas sedimentarias relativamente porosas tienen densidad baja-media.
- Las rocas ígneas y metamórficas presentan las mayores densidades.
- Las rocas ferromagnesianas (máficas) son más densas que las rocas félsicas.

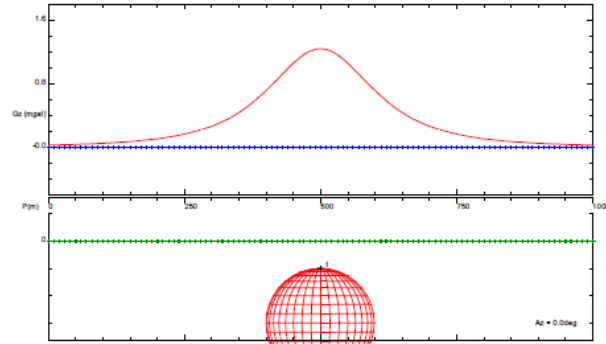




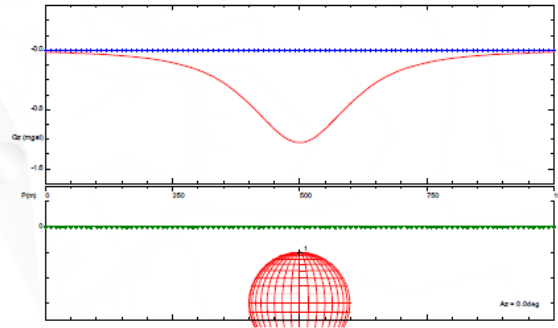


CCMASTERS
EDUCATION®

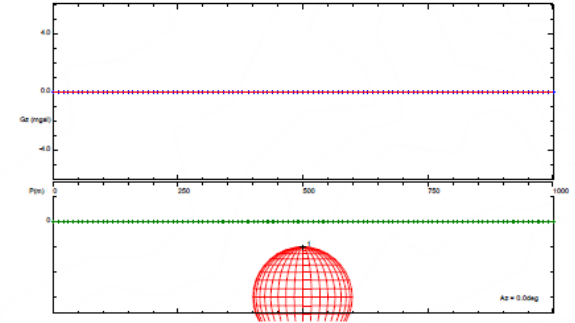
Contraste entre el cuerpo y el medio



$\delta \text{ cuerpo} > \delta \text{ medio}$



$\delta \text{ cuerpo} < \delta \text{ medio}$



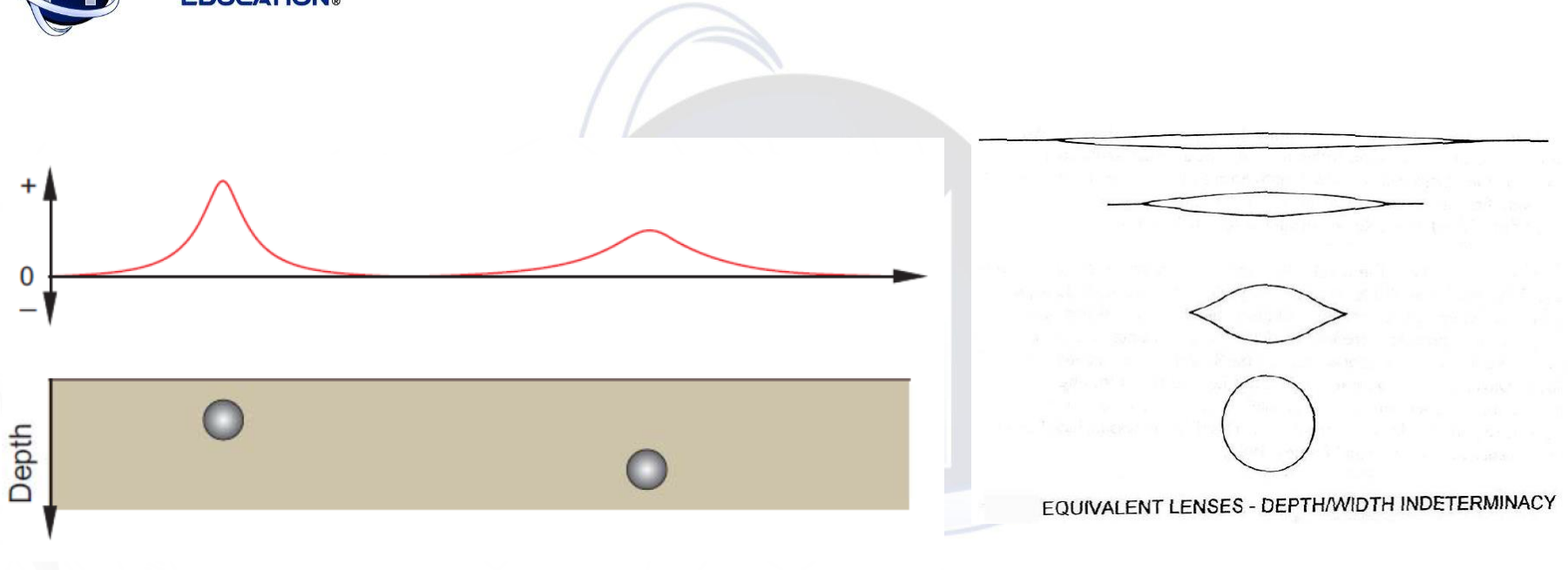
$\delta \text{ cuerpo} = \delta \text{ medio}$



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



CCMASTERS
EDUCATION®



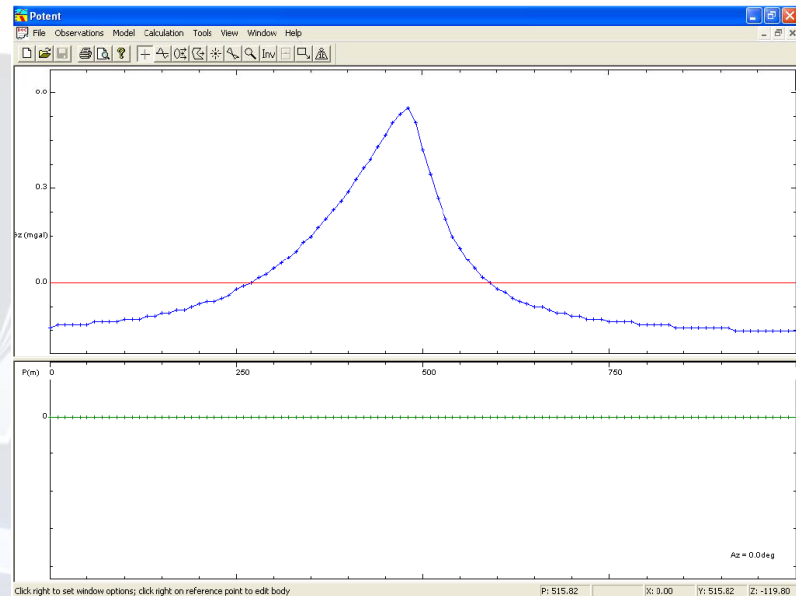
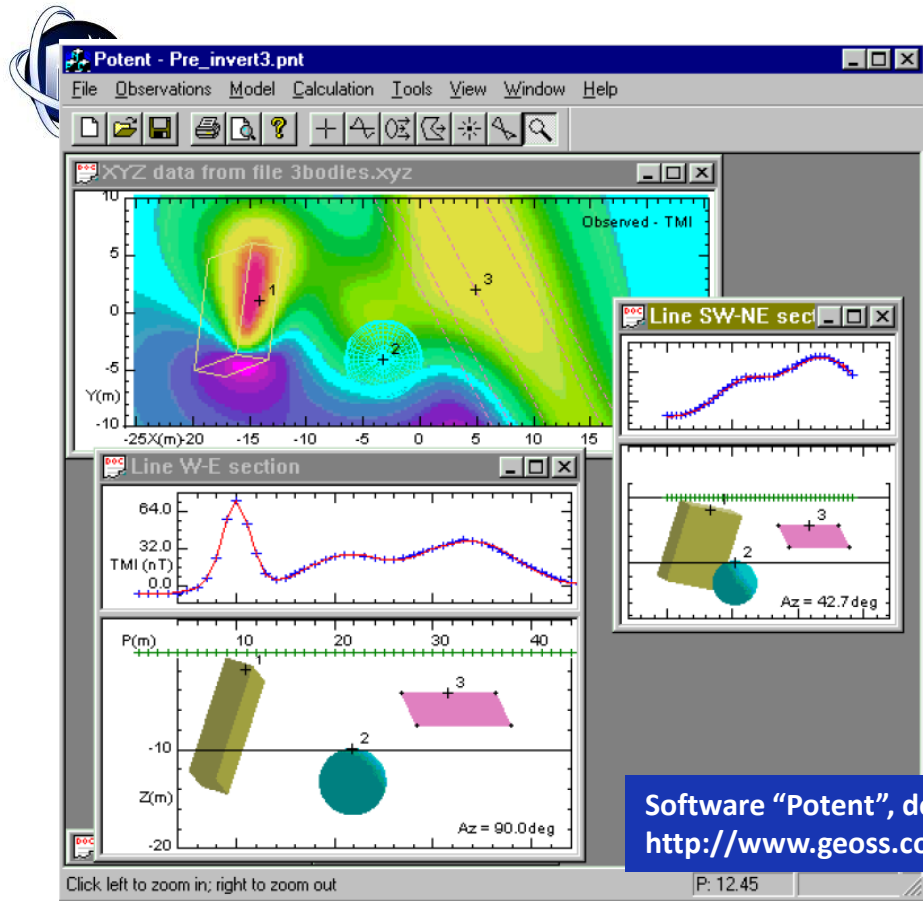
Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



- El valor g en la superficie terrestre no varía solo por la presencia de cuerpos de densidad contrastante en el subsuelo.
- Otras fuentes de variación son:
 - Por latitud
 - Por altitud
 - Por topografía
- La aceleración de la gravedad terrestre tiene fluctuaciones temporales mínimas (mareas terrestres o *tides*).
- Efecto instrumental: todos los gravímetros experimentan deriva o *drift* en sus mediciones a lo largo del día.

Todos estos factores provocan variaciones significativas en las mediciones y deben ser corregidos.





Software "Potent", de GSS Solutions
<http://www.geoss.com.au/downloads.html>



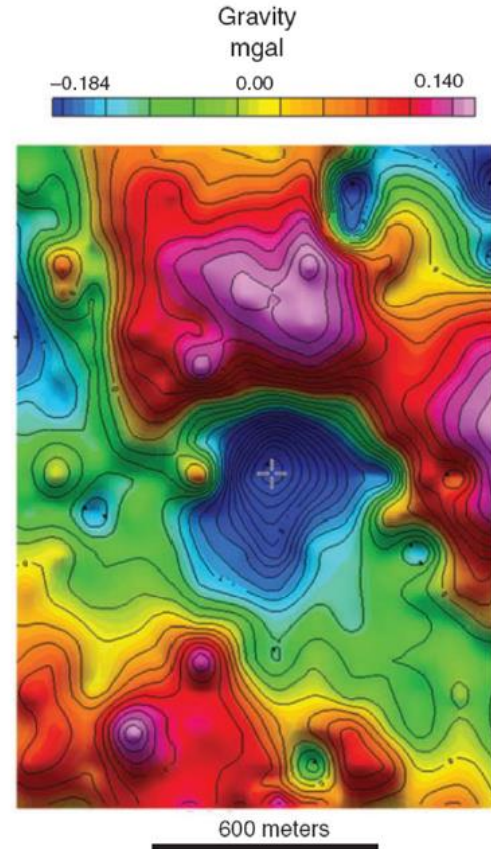
Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



CCMASTERS
EDUCATION®

¿Cómo se ve un mapa gravimétrico?

Anomalías negativas producidas por la alteración arcillosa de cuerpos kimberlíticos en los niveles superficiales.



Cunion 2009, Expl. Geoph.



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com

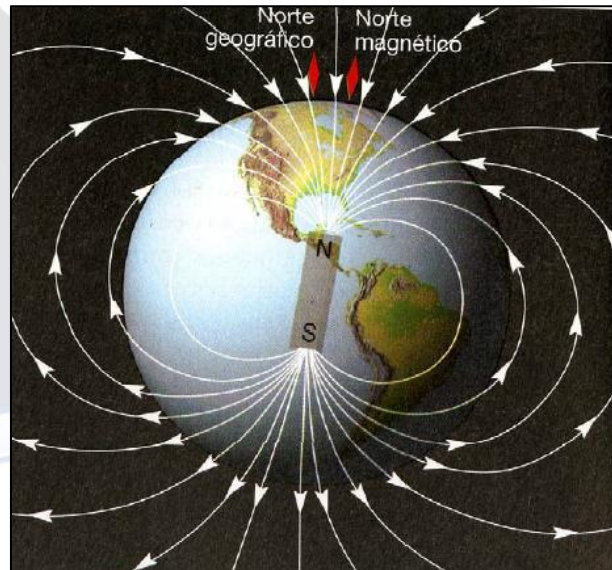
Magnetometría

Anomalías en la
intensidad del
campo magnético
terrestre

Son medidas con
magnetómetros

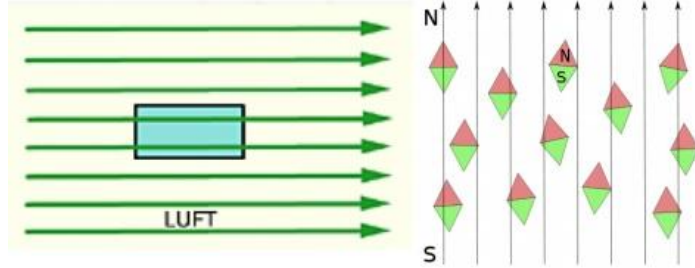
Presencia de
cuerpos
magnetizados en
el subsuelo

Susceptibilidad
magnética y
magnetización
espontánea

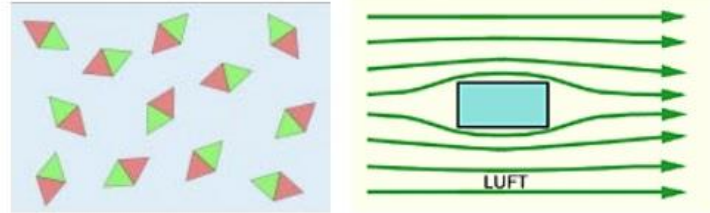




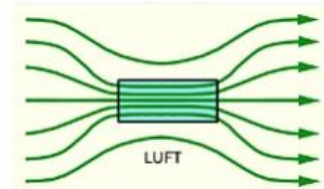
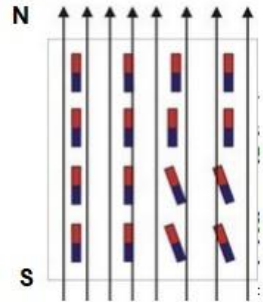
PARAMAGNÉTICO



DIAMAGNÉTICO



FERROMAGNÉTICO





- Los minerales más abundantes que conforman las rocas, como el cuarzo, feldespatos y calcita, exhiben propiedades **diamagnéticas**. Su susceptibilidad magnética es negativa, pero su valor absoluto es muy reducido.
- En contraste, los minerales que contienen Fe–Mn–Co–Ni en su estructura, sin experimentar un superintercambio significativo, muestran propiedades **paramagnéticas**. Estos minerales presentan una susceptibilidad magnética positiva, como es el caso de la biotita, anfíboles, piroxenos y olivinos con contenido de Fe.
- En minerales donde el Fe (o Mn, Co, Ni) se encuentra en condiciones que permiten el superintercambio, como en óxidos y algunos sulfuros, se produce una magnetización espontánea, y la susceptibilidad magnética es varios órdenes de magnitud mayor que la susceptibilidad paramagnética. Este fenómeno se conoce como **ferromagnetismo** en un sentido más amplio.



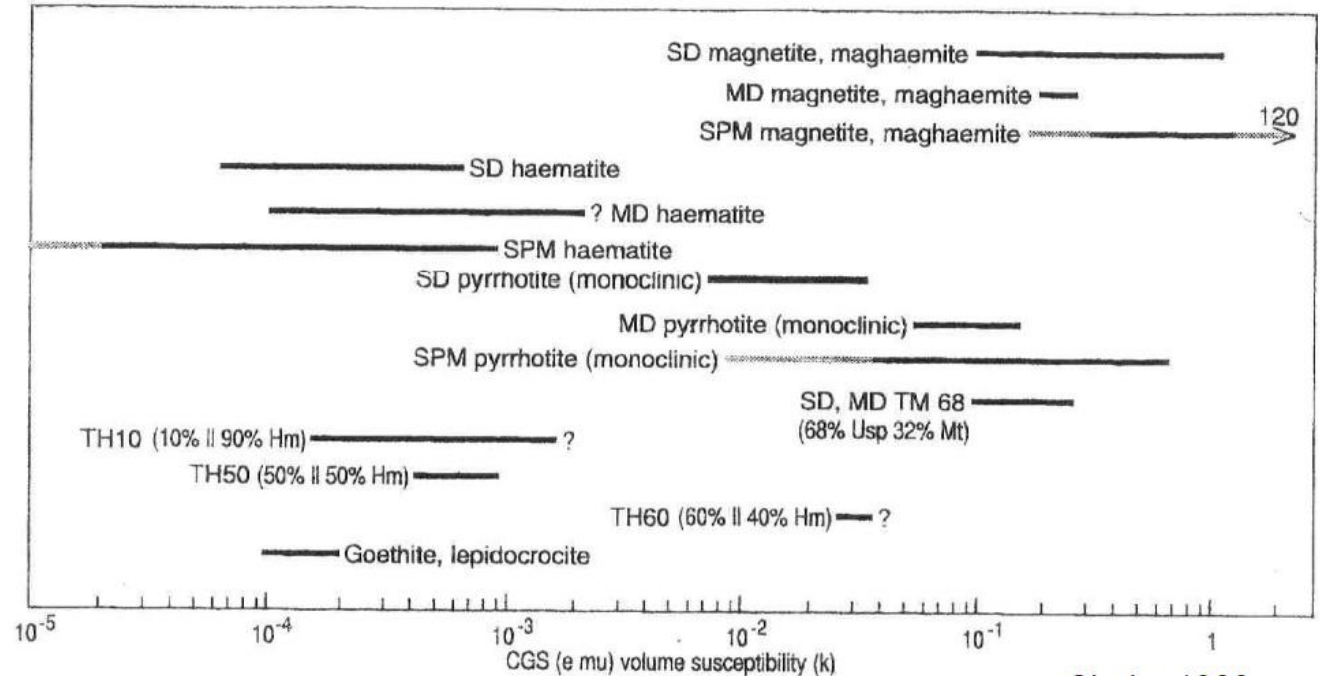


- **El aumento de temperatura** provoca mayor agitación térmica en la estructura cristalina.
- A cierta temperatura crítica, la agitación térmica es lo suficientemente intensa como para impedir el superintercambio.
- A la temperatura crítica, el mineral deja de ser ferromagnético.
- Se comporta como paramagnético debido a la inhibición del superintercambio.
- Cada mineral ferromagnético tiene su temperatura crítica característica, conocida como temperatura de Curie.
- La magnetita, hematita y pirrotina monoclinica dejan de ser ferromagnéticas a temperaturas críticas específicas.
- Ejemplos:
 - Magnetita: 578°C
 - Hematita: 675°C
 - Pirrotina monoclinica: 325°C





La **susceptibilidad magnética** de los minerales de Fe varía en órdenes de magnitud, según la estructura cristalina.

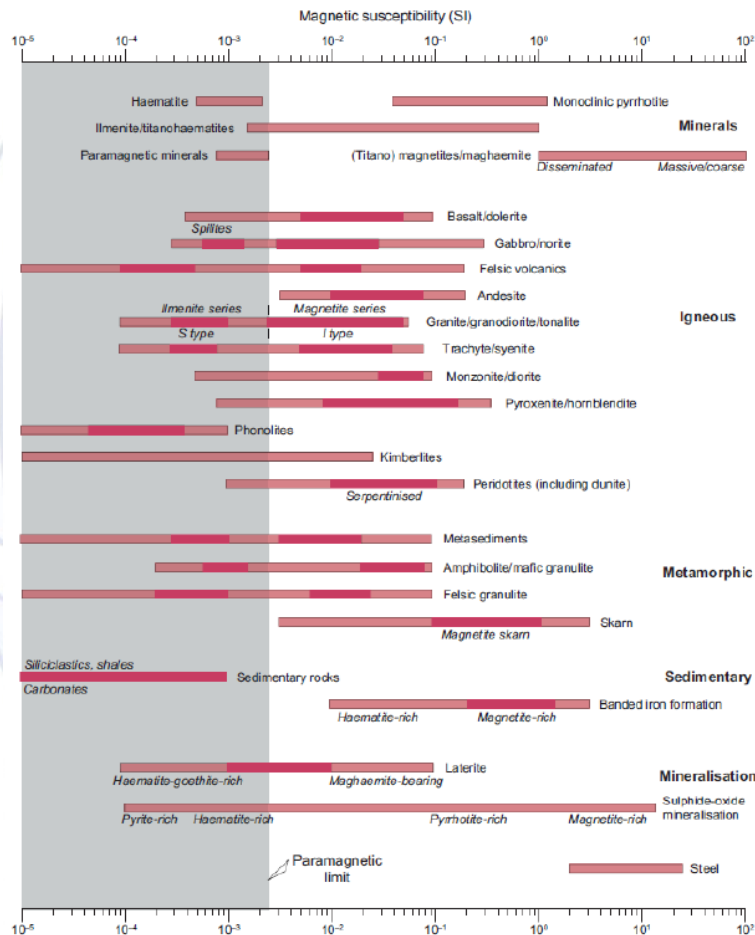


Clark , 1983





La **susceptibilidad magnética** de una roca varía según el contenido de minerales ferromagnesianos.

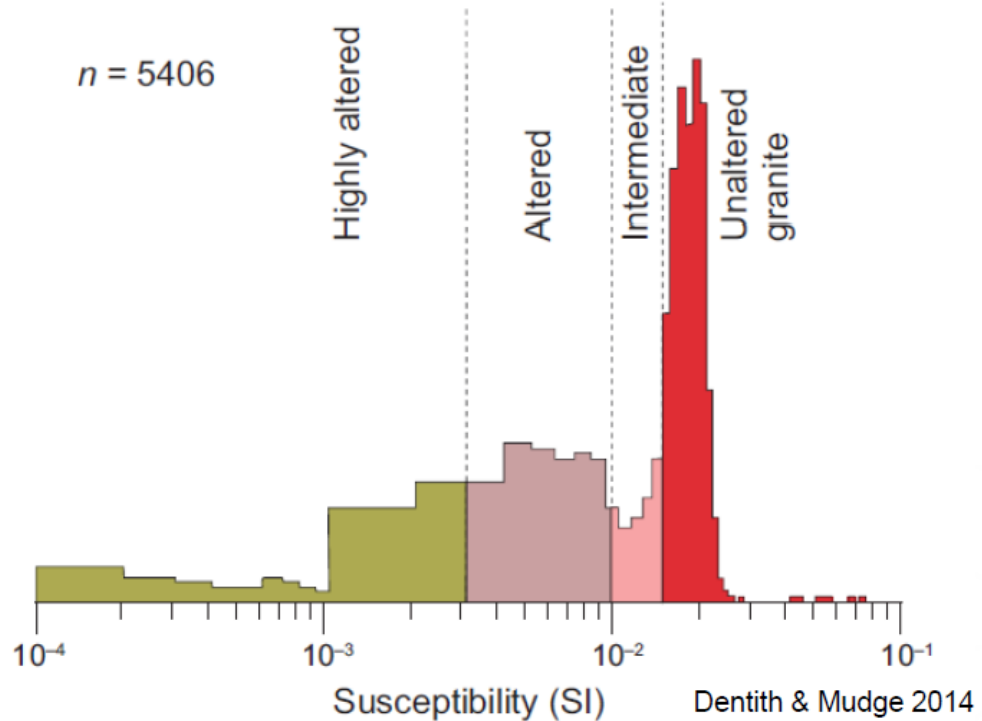


de Clark, 1997



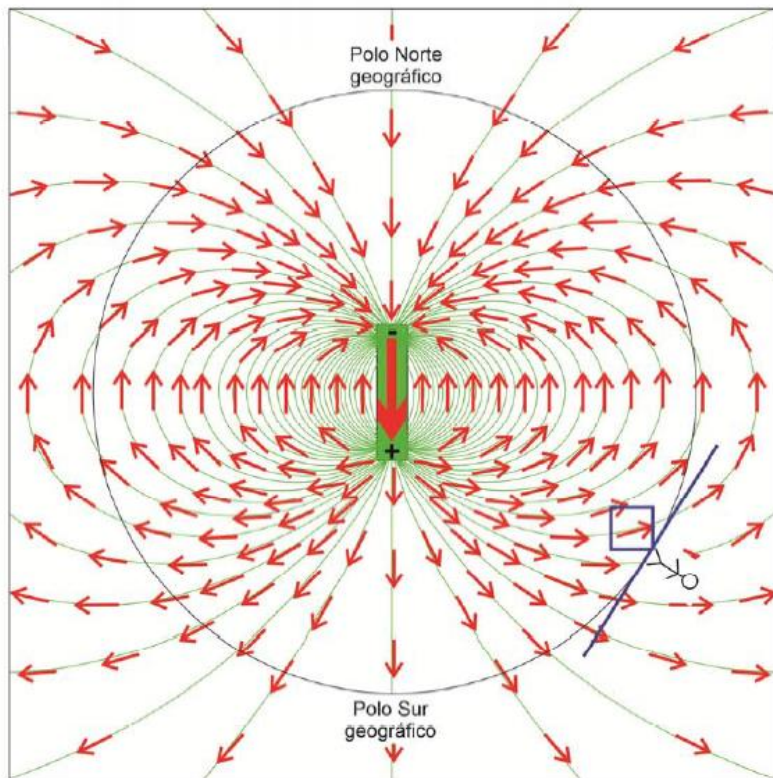


La presencia o ausencia
de magnetita provoca
variaciones significativas
en la susceptibilidad
magnética de las rocas.

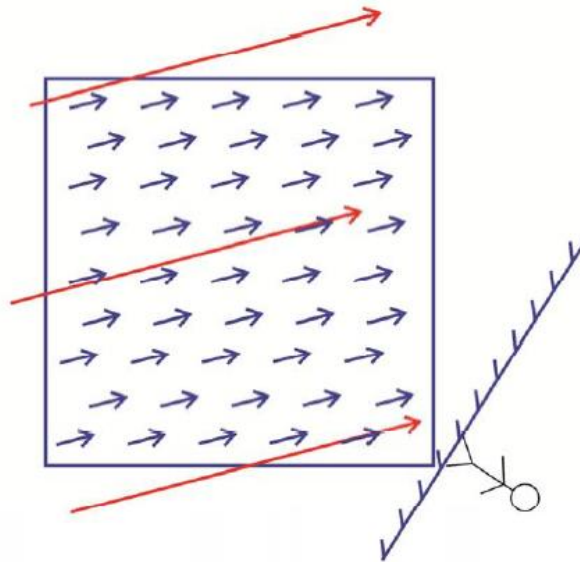




CC



**Magnetización
inducida** paralela a la
dirección local del
campo magnético
inductor

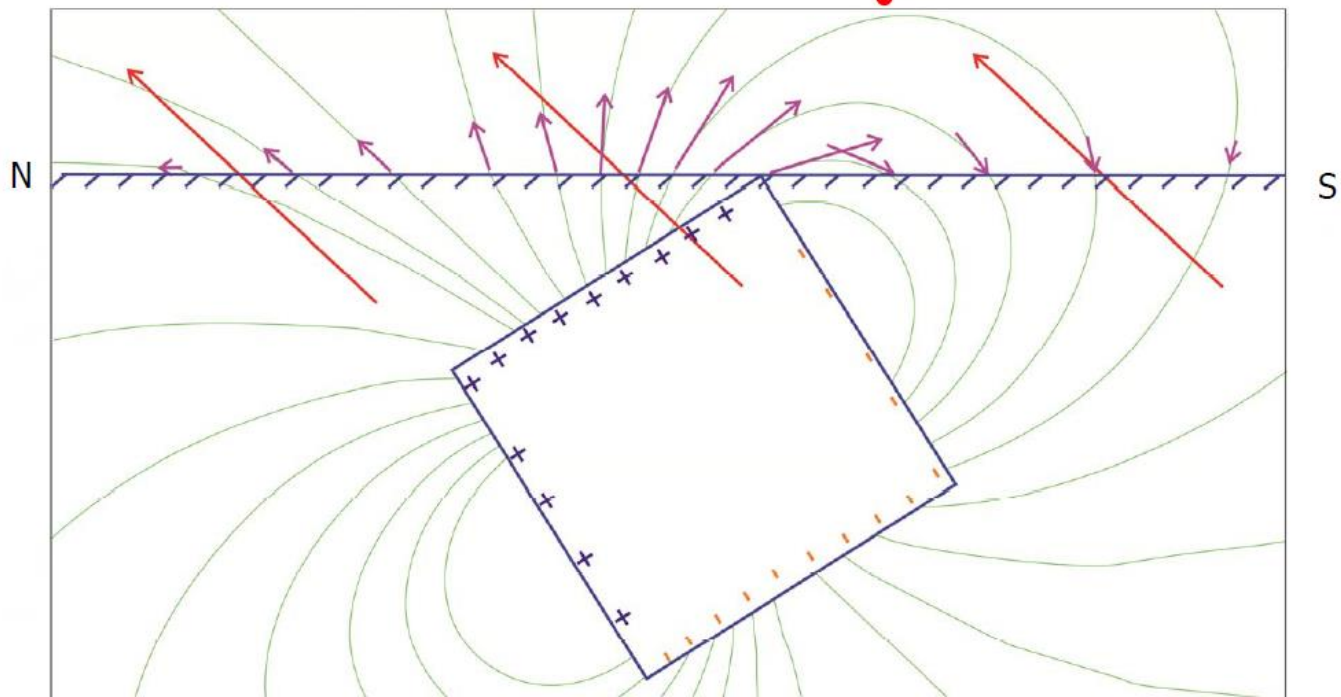
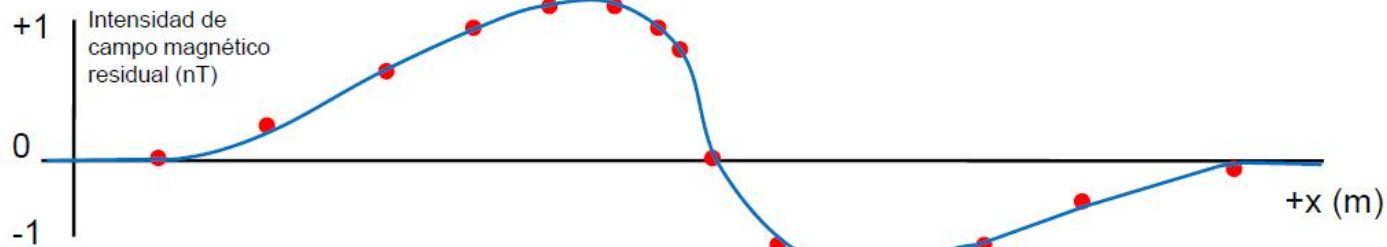


Visita Nuestro

www.ccmasterseducation.com



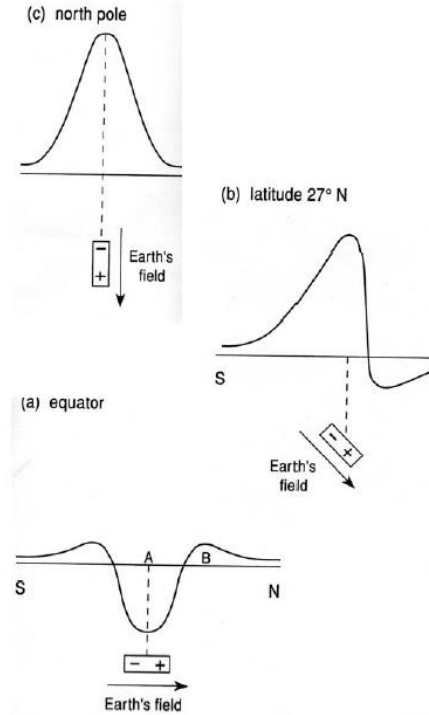
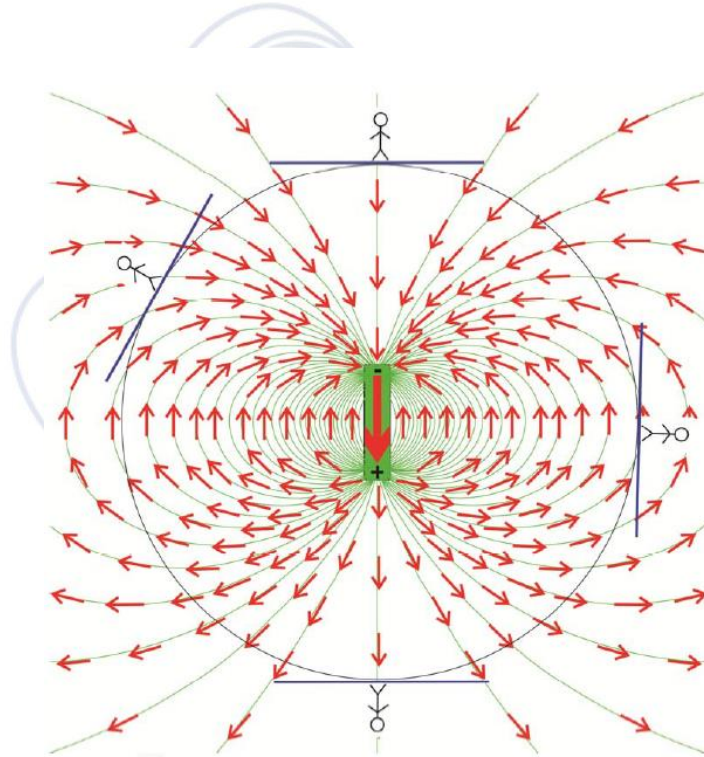
CCM
E



Visita Nuestro
www.ccm

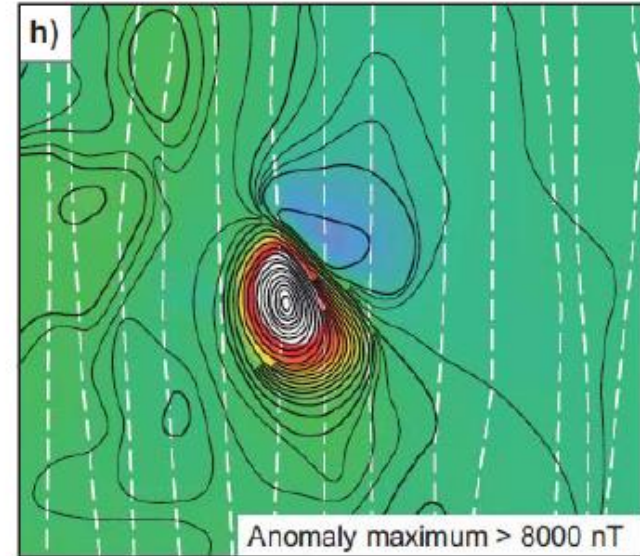


Un cuerpo magnetizado puede generar anomalías magnéticas que varían según la ubicación en la latitud terrestre.

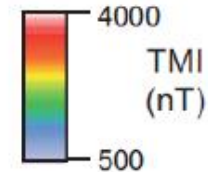




- Las anomalías magnéticas son más difíciles de interpretar en comparación con las anomalías gravimétricas.
- La complejidad surge debido a la naturaleza dipolar del Campo Magnético Total (CMT) y al carácter no escalar (vectorial) de la magnetización.
- **No siempre es el caso** que los cuerpos se magnetizan exclusivamente por la inducción del CMT



0 1
Kilometre

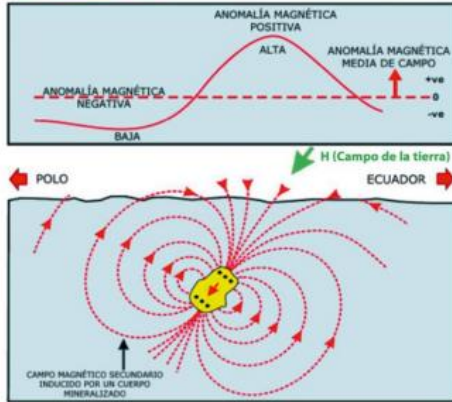


Dentith & Mudge 2014

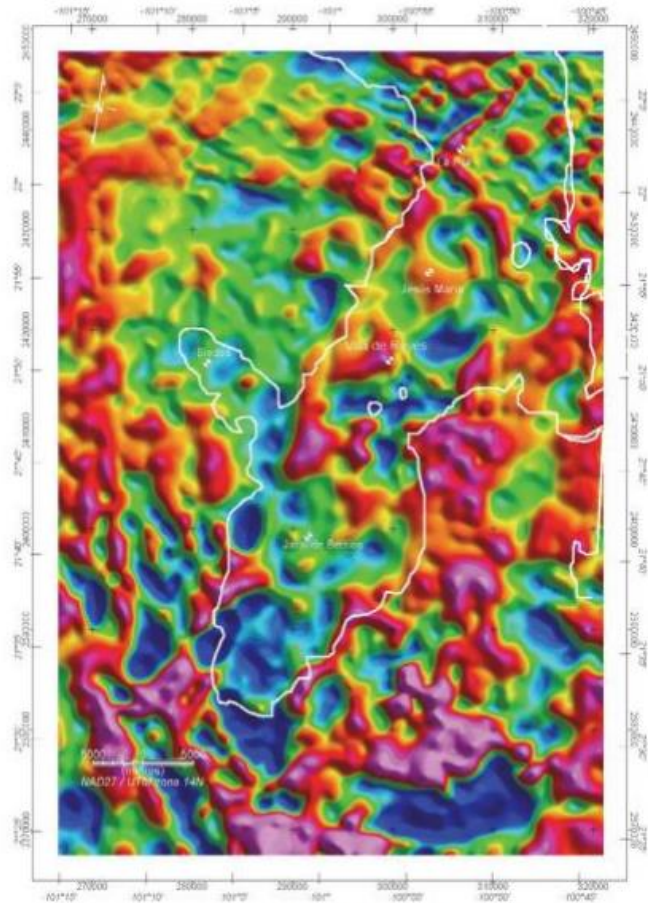




CCMASTERS
EDUCATION®



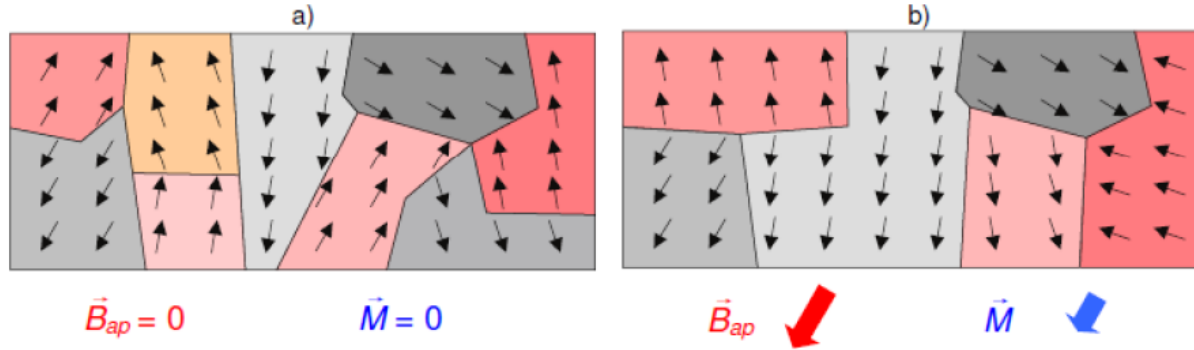
Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, S.L.P.



López-Loera y González, 2013



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com



En presencia de campo externo, las paredes de dominio se desplazan de modo que los dominios orientados favorablemente aumentan de tamaño. Por lo tanto, el material adquiere una magnetización neta paralela al campo aplicado.

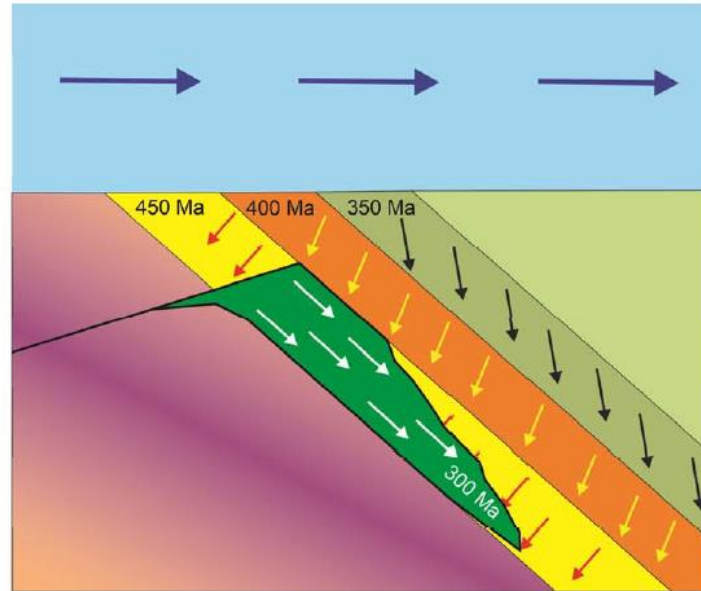
Al remover el campo aplicado, las paredes vuelven a su posición de equilibrio y la magnetización desaparece.

La magnetización así adquirida por el material ferromagnético es una *magnetización inducida*.



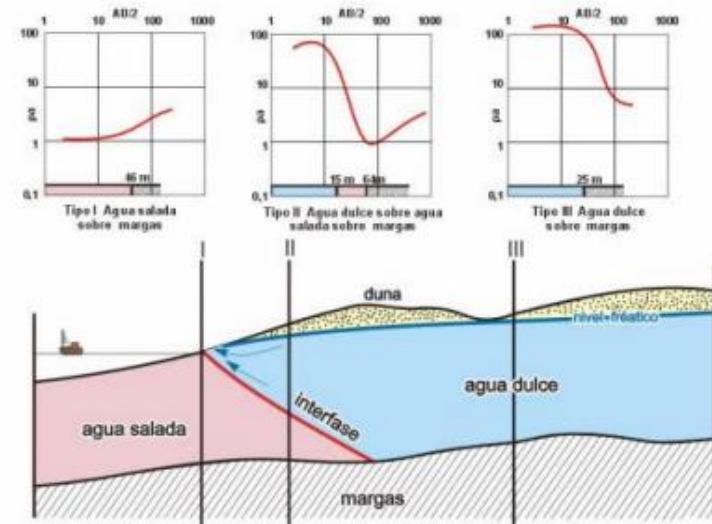
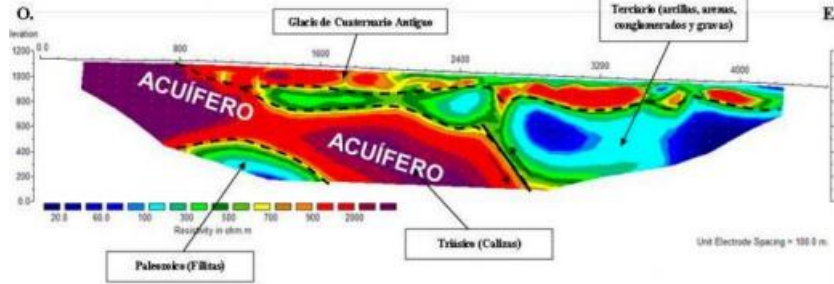


La posición original de las rocas fue modificada por traslación/rotación del continente/placa, y por deformación tectónica. El estudio de la orientación de la remanencia magnética de las rocas permite reconstruir esos movimientos: *base del Paleomagnetismo*.





Métodos Resistivos



A, B: electrodos de corrientes
M, N: electrodos de potencial (voltaje)
I: corriente eléctrica
U: voltaje
P1, P2 resistividad
— líneas de corriente





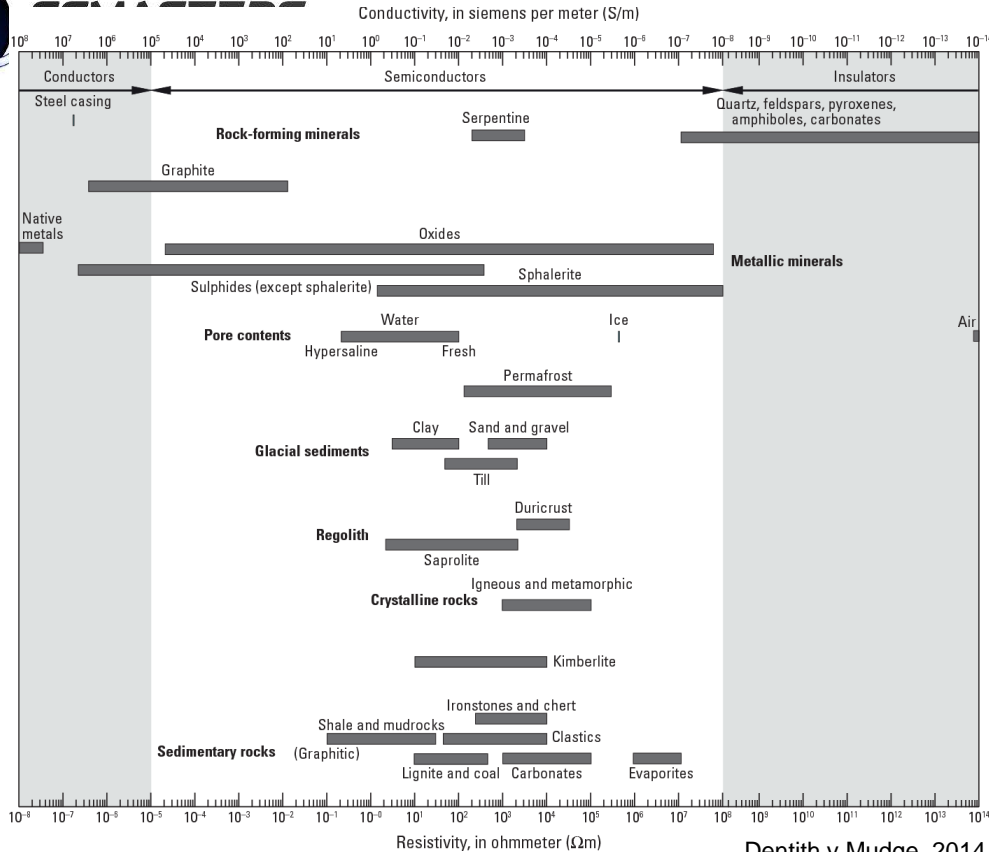
- Ley de Ohm: $V = I \cdot R$
- La **Resistividad (rho)** es la resistencia específica de cada material, depende de su factor geométrico (k).

$$\rho = Rk_{\text{geom}}$$

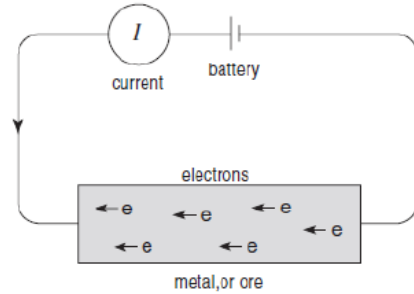
$$V = I \frac{\rho}{k_{\text{geom}}}$$

- Unidades: Ohm-metro ($\text{Ohm} \cdot \text{m}$)
- Conductividad: es la recíproca de la resistividad, se mide en Siemens (S) por metro.
- $1 (\text{S/m}) = 1 / (\text{Ohm} \cdot \text{m})$



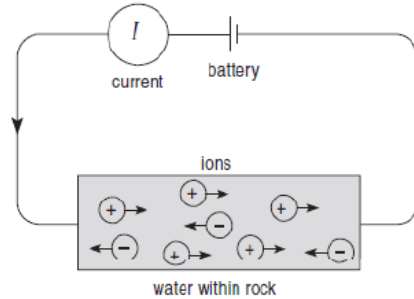


(b) metal or conducting ore

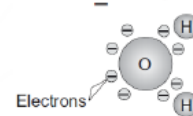


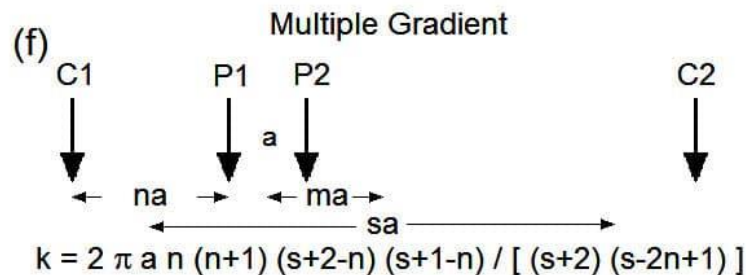
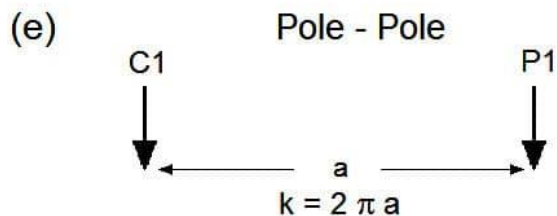
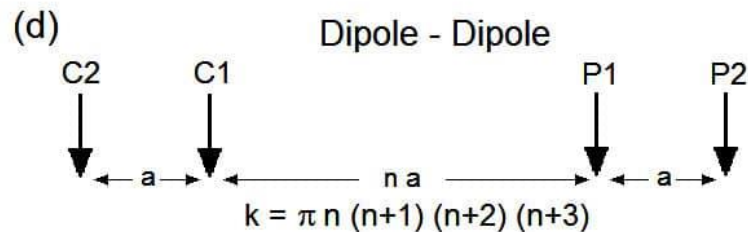
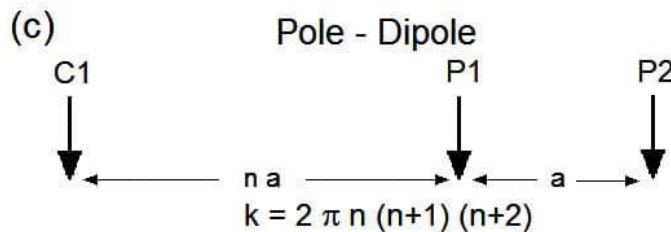
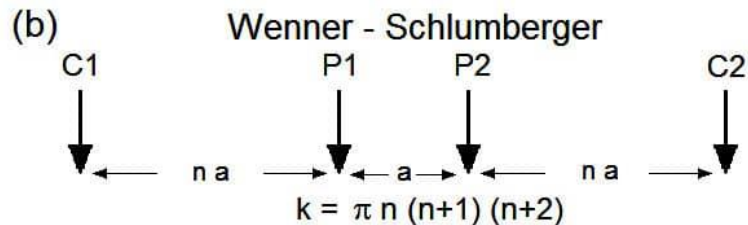
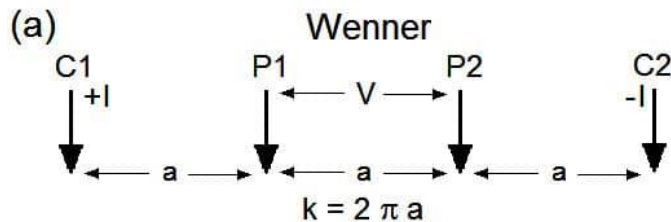
Mussett y Khan, 2000

(a) rock



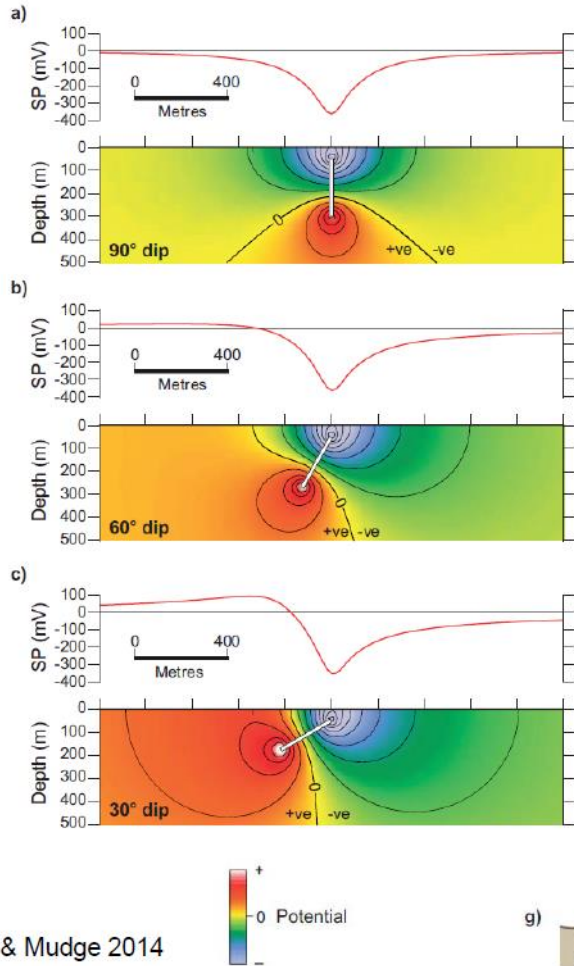
Electrical polarisation





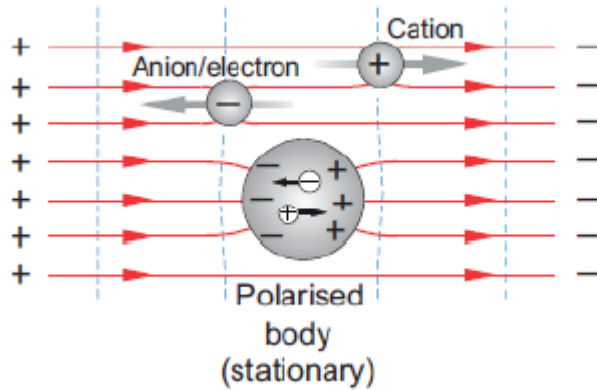
Potencial espontáneo

- Es un método pasivo en el que se miden las **diferencias de potencial** producidas naturalmente, de diversos orígenes.
- El origen de estos campos eléctricos naturales (potenciales espontáneos) está asociado a diferentes fenómenos como por ejemplo a las variaciones de las propiedades del terreno (cambios de humedad, de su química, etc.), la presencia de cuerpos metálicos, actividad biológica de la materia orgánica, etc.

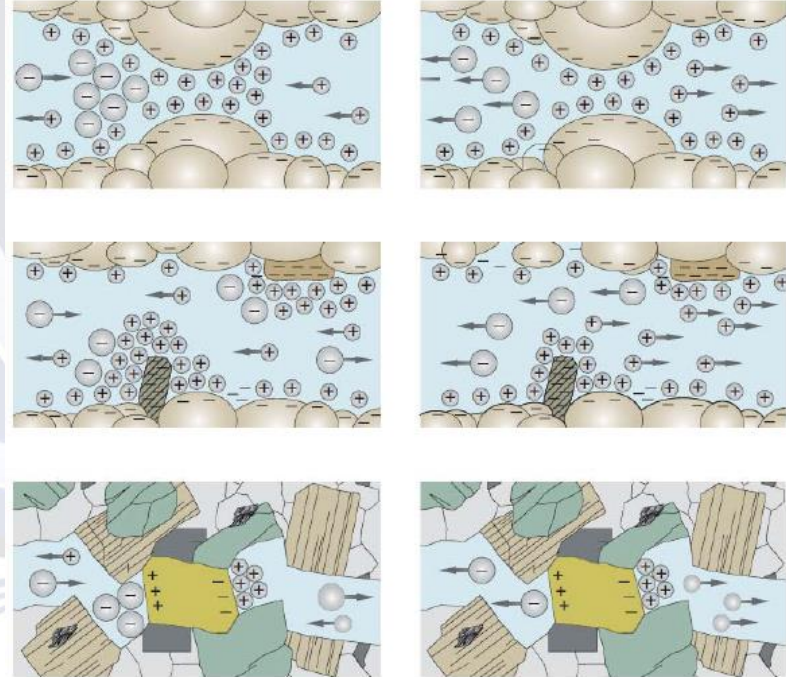




Polarización Inducida



- Se produce acumulación de carga en el electrolito (membrana o grano), mientras circula corriente
- Se mide la **cargabilidad**.



⊕ ⊖ Ions Clay minerals Fibrous minerals Conductive grains Pores





Table 7. Relative IP chargeability for common ore minerals and rocks (after King 2007 and Oldenburg & Jones 2007).

Material type	Chargeability (msec)	Material type	Chargeability (msec)
<i>Chargeability of minerals at 1% concentration in the samples</i>		<i>Charging and discharging times about one minute each (much longer than field survey systems), therefore values are larger than field measurements</i>	
Pyrrhotite	~10	20% Sulphides	2000 - 3000
Pentlandite	~10	8-20% Sulphides	1000 - 2000
Pyrite	13.4	2-8% Sulphides	500 - 1000
Copper	12.3	Volcanic tuffs	300 - 800
Graphite	11.2	Sandstone, Siltstone	100 - 500
Chalcopyrite	9.4	Dense volcanic rocks	100 - 500
Magnetite	2.2	Shale	50 - 100
Galena	3.7	Granite, Granodiorite	10 - 50
Hematite	0.0	Limestone, Dolomite	10 - 20

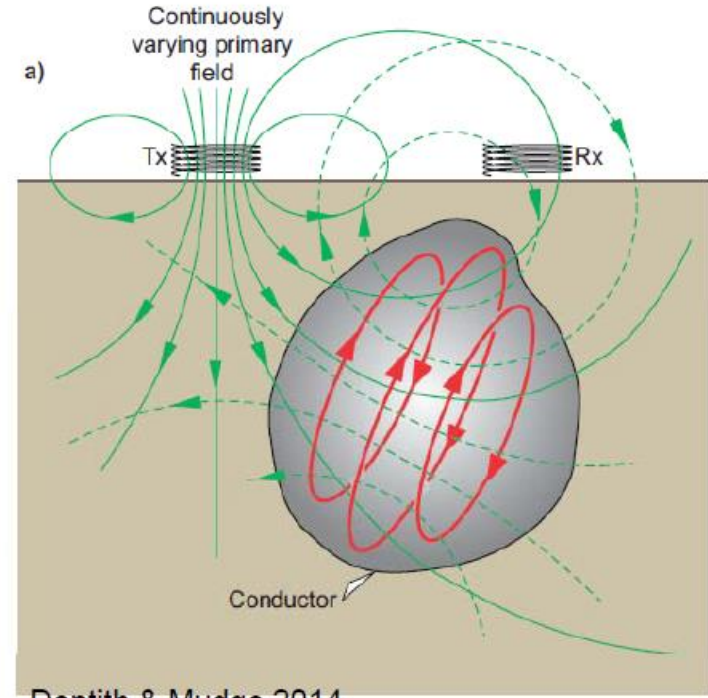




Métodos electromagnéticos

Dominio de la frecuencia (FDEM)

- Se usa una corriente alterna en un transmisor para generar un campo magnético primario.
- El campo induce corrientes Eddy.
- Las corrientes Eddy tienen un campo magnético secundario que es detectado por un receptor.
- No se requiere inducción de corriente en el subsuelo.



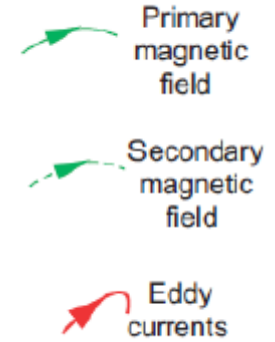
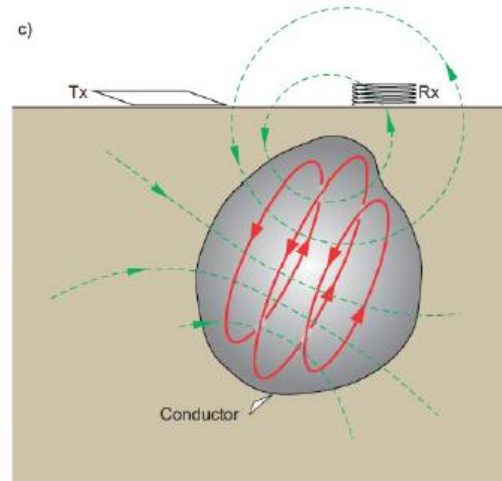
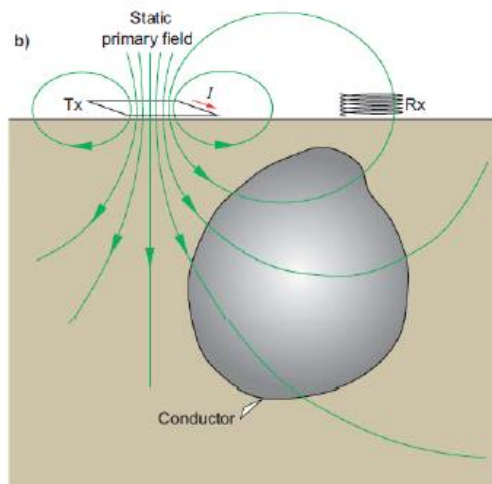
Dentith & Mudge 2014





Dominio del tiempo (TDEM)

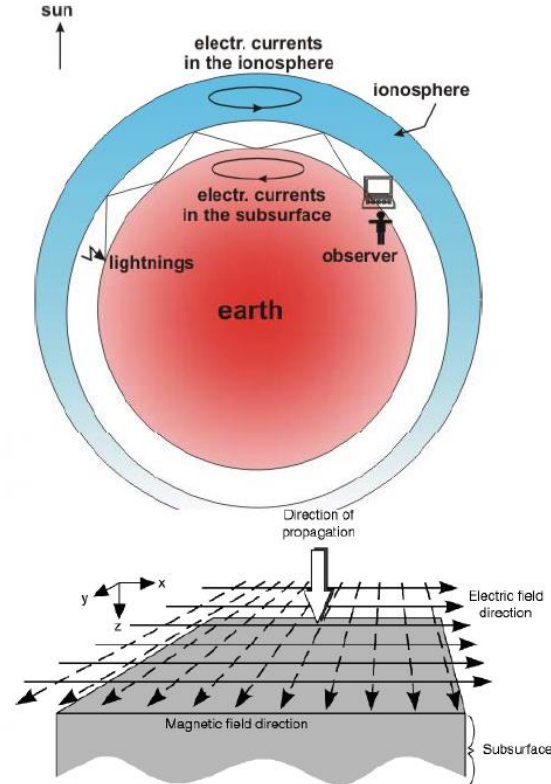
- El campo magnético primario se consigue conectando o desconectando una corriente continua.
- Al cortar la corriente, se inducen corrientes Eddy en el cuerpo conductor que se oponen al cambio en el campo primario.
- El campo secundario es detectado por el receptor mientras el primero está inactivo.
- La duración y el decaimiento de las corrientes Eddy dependen de las propiedades y la geometría del conductor.





Método magnetotelúrico

- Se aprovecha de las **variaciones del campo electromagnético natural**.
- Estas variaciones **inducen corrientes eléctricas en el subsuelo**, que fluyen principalmente como remolinos horizontales de grandes dimensiones.
- El flujo de corriente es afectado por las variaciones en la resistividad de las rocas del subsuelo.
- Frecuencias de 5-10 Hz (un ciclo por día) hasta miles de Hz, longitudes de onda de cientos o miles de Km.





- La **resistividad** se calcula a partir de la **relación entre campo eléctrico y magnético** (impedancia), pero considerando el hecho de que la intensidad de la corriente disminuirá con la profundidad.

$$\rho_a = \frac{0.2}{f} \left(\frac{E}{B} \right)^2$$

Impedancia
(oposición al paso de la corriente alterna)

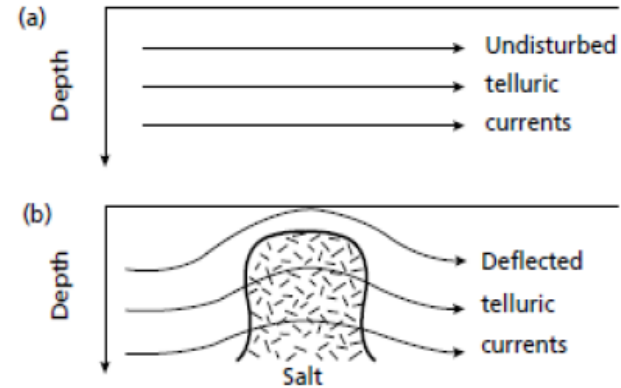
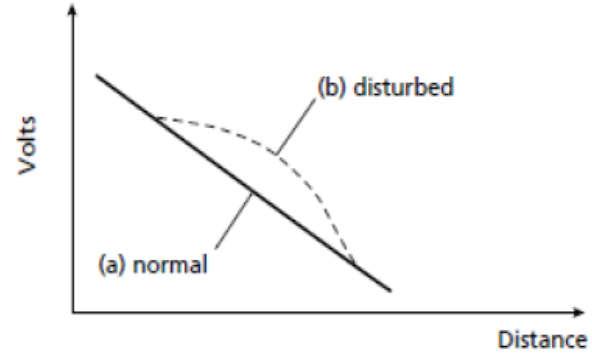
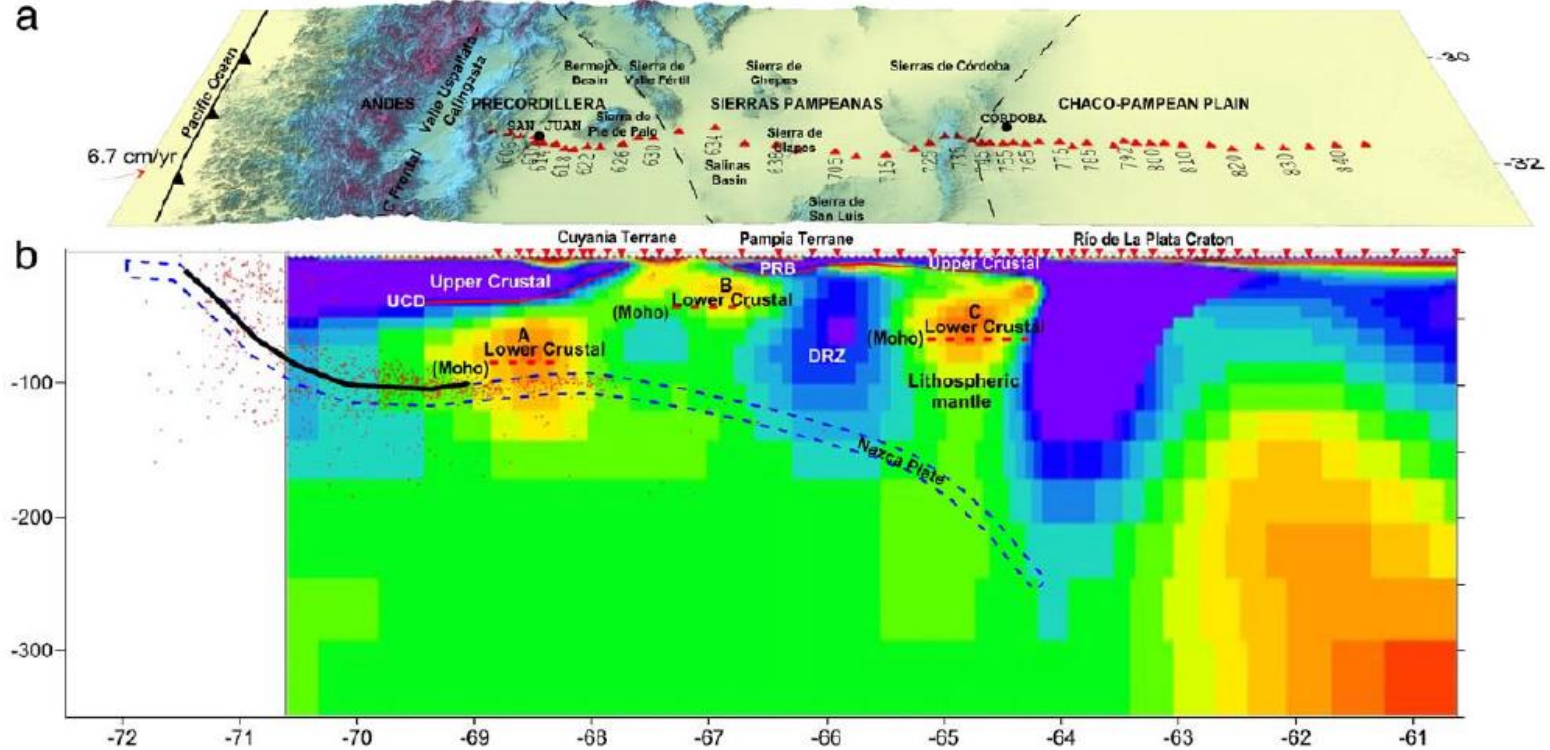
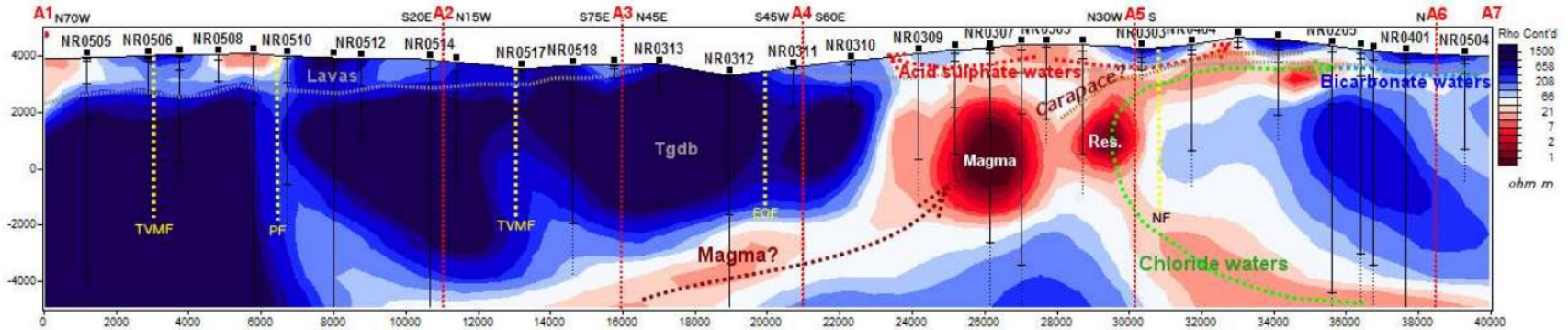


Fig. 9.21 The instantaneous potential gradient associated with telluric currents. (a) Normal, undisturbed gradient. (b) Disturbed gradient resulting from deflection of current flow by a salt dome.







Perfil de resistividad (MT) a lo largo de una sección perimétrica alrededor del VNR.
Fuente: González-García et al. (2015)





Métodos sísmicos

1. Ondas P (Primarias o Compresivas):

- Transmisión: Comprimen y expanden el material en la misma dirección de propagación.
- Características: Viajan a velocidades medias de 5.5 a 13.5 Km/s.

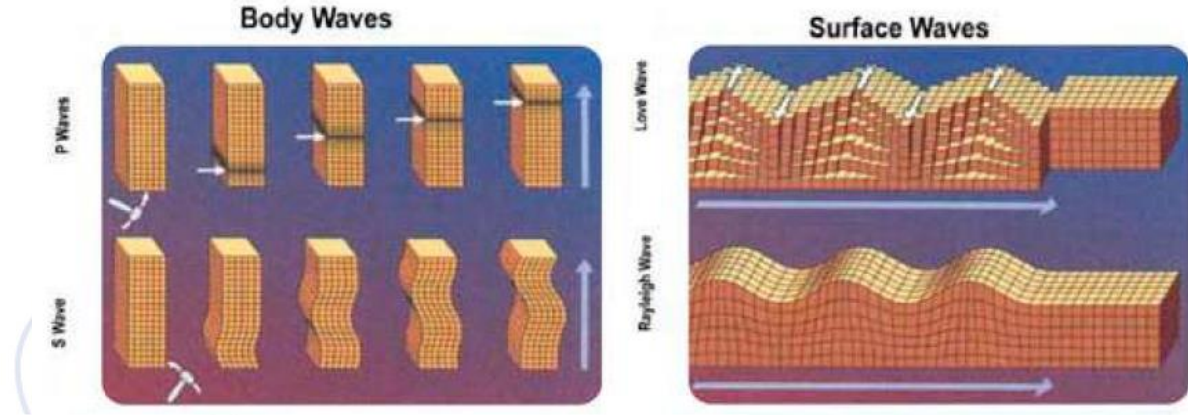
2. Ondas S (Secundarias o de Cizalla):

- Transmisión: Deforman las partículas del material, oscilando en una dirección perpendicular a la propagación.
- Características: Velocidad de aproximadamente 4 a 8 Km/s.

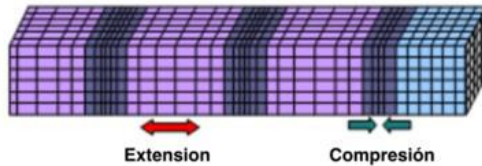
3. Ondas Superficiales:

- Transmisión: Se forman cuando otras ondas sísmicas alcanzan la superficie terrestre y se desplazan exclusivamente por ella.
- Velocidad: Son las más lentas.
- Impacto: Causan catástrofes, pero no suelen emplearse en estudios debido a su limitada capacidad de penetración en el interior terrestre.

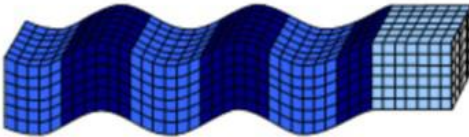




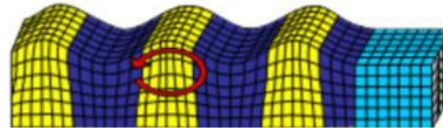
(a) Ondas P



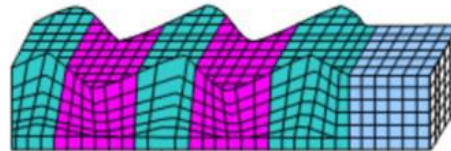
(b) Ondas-S



(c) Ondas Rayleigh



(d) Ondas Love



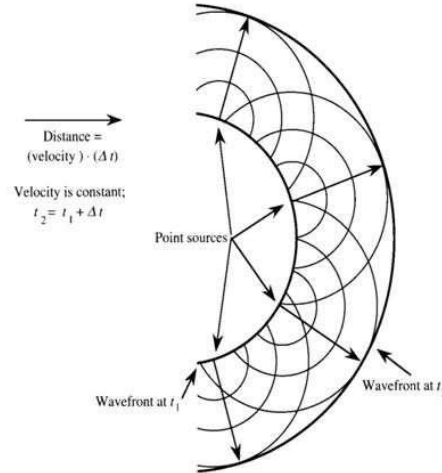
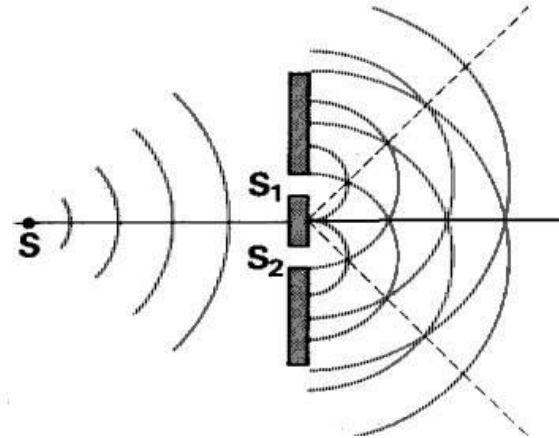
Dirección
Transmisión de Energía



Vis



Principio de Huygens



Todo punto de un frente de onda es considerado como un emisor de nuevas ondas.

Las ondas al superponerse originan un nuevo frente de ondas que envuelve a las anteriores

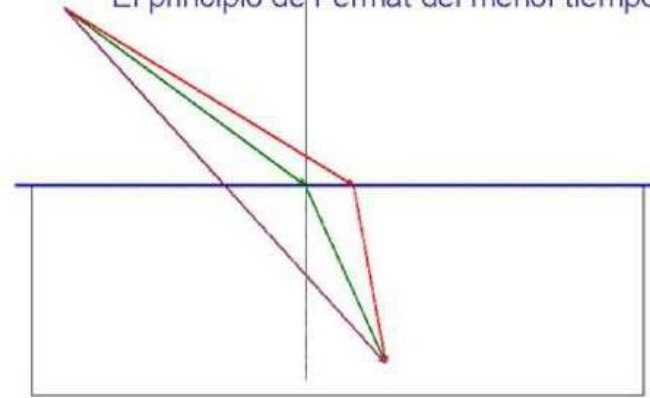




- Según el cual un rayo dado sigue, de un punto a otro, el camino que requiere el mínimo de tiempo recorrido.
- La geometría de las trayectorias está regida por este principio.

Principio de Fermat

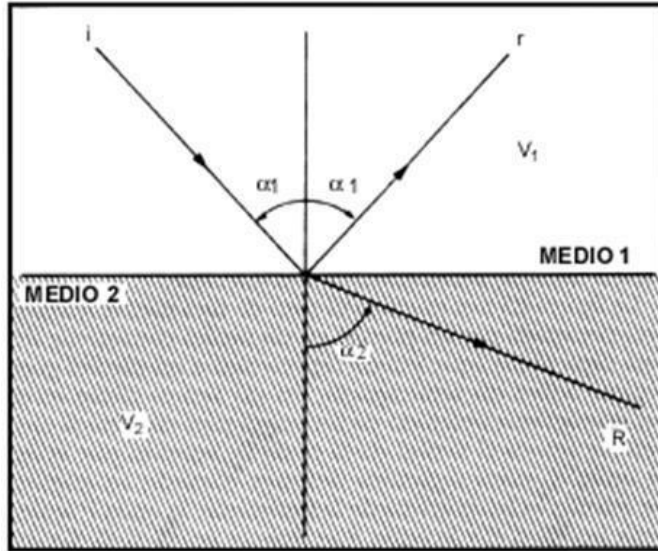
El principio de Fermat del menor tiempo



La luz viaja 1,3 veces más rápido en el aire que en el agua

La línea verde no representa el trayecto más corto, pero sí el más rápido.





- **Ley de Reflexión:** El ángulo de incidencia de una onda es igual al ángulo de reflexión con respecto a la normal de la superficie.
- **Ley de Refracción:** Cuando una onda pasa de un medio a otro, cambia de dirección en relación con la normal debido a las diferencias de velocidad, según la ley de Snell.



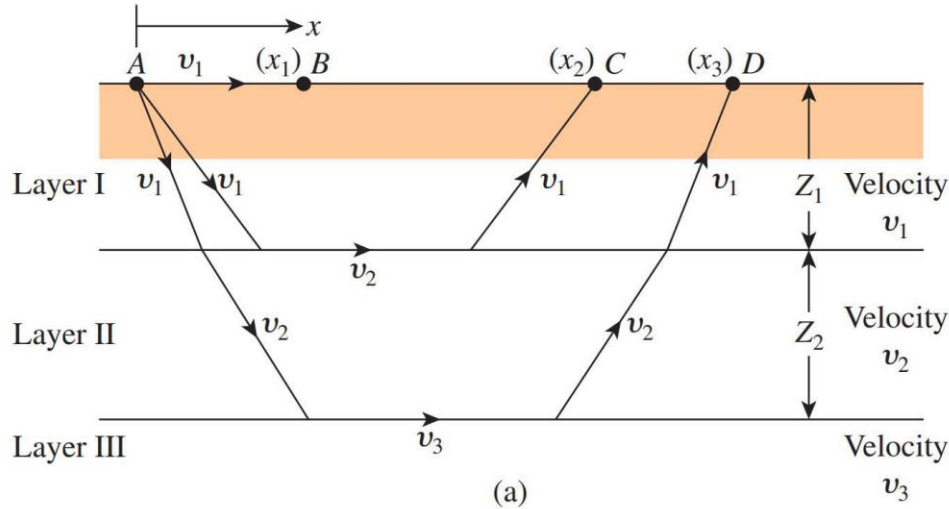
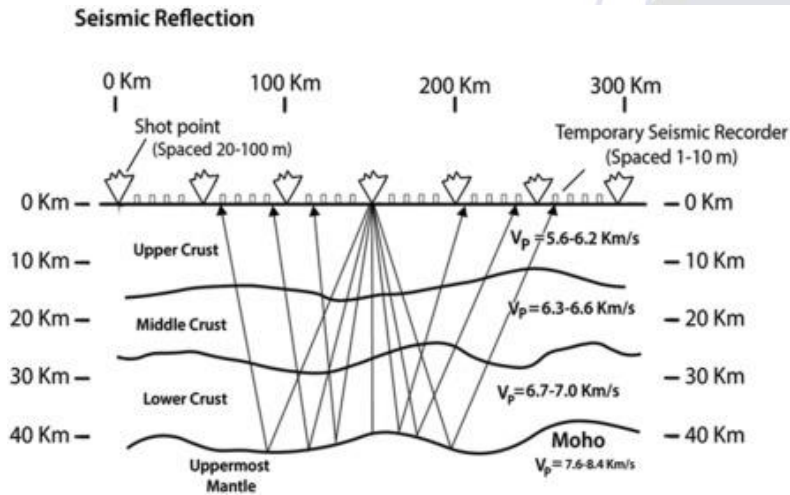


Figure 3.45 Seismic refraction survey

- **La sísmica de refracción** Mide el tiempo de llegada de las ondas de compresión (P) de una fuente artificial a lo largo de una línea de sensores (geófonos).
- Los resultados definen áreas de contraste entre materiales de diferente velocidad y densidad, lo que permite reconstruir un perfil bidimensional de ondas P (V_p) en función de la profundidad.
- Las velocidades de las ondas están controladas por los parámetros elásticos del material y pueden correlacionarse con numerosas propiedades geomecánicas.





- La **sísmica de reflexión** es un método de exploración geofísica que utiliza ondas acústicas generadas artificialmente para proporcionar información sobre la estructura subterránea.
- Las ondas acústicas se reflejan en diferentes estructuras y objetos dentro de la corteza terrestre de acuerdo con su impedancia acústica.
- Los datos se procesan para producir una representación visual del subsuelo, revelando la geometría tridimensional de las estructuras geológicas hasta kilómetros de profundidad con una resolución de decenas de metros.





	Refracción Sísmica	Reflexión Sísmica
Objetivo	Interpreta las propiedades de los suelos y detecta la profundidad de la roca	Proporciona información sobre la estructura subterránea
Método	Mide el tiempo de llegada de las ondas de compresión (P) de una fuente artificial a lo largo de una línea de sensores (geófonos)	Utiliza ondas acústicas generadas artificialmente que se reflejan en diferentes estructuras y objetos dentro de la corteza terrestre de acuerdo con su impedancia acústica
Resultados	Define áreas de contraste entre materiales de diferente velocidad y densidad, lo que permite reconstruir un perfil bidimensional de ondas P (V_p) en función de la profundidad	Los datos se procesan para producir una representación visual del subsuelo, revelando la geometría tridimensional de las estructuras geológicas hasta kilómetros de profundidad con una resolución de decenas de metros



Método geofísico	Propiedad física principal	Aplicaciones									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gravimétrico	Densidad	P	P	S	S	S	S	X	X	S	X
Magnético	Susceptibilidad magnética	P	P	P	S	X	C	X	P	P	X
Refracción sísmica	Modulo elástico, densidad	P	P	C	P	S	S	X	X	X	X
Reflexión sísmica	Modulo elástico, densidad	P	P	C	S	S	C	X	X	X	X
Resistivo	Resistividad	C	C	P	P	P	P	P	S	P	C
Potencial espontáneo	Diferencia de potencial	X	X	P	C	P	C	C	C	X	X
Polarización inducida	Resistividad, capacitancia	C	C	P	C	S	C	C	C	C	C
Electromagnético (EM)	Conductancia, inductancia	S	P	P	P	P	P	P	P	P	C
EM - Muy baja frecuencia	Conductancia, inductancia	C	C	P	C	S	S	C	C	C	X
Ground Penetrating Radar	Permitividad, conductividad	X	X	C	P	P	P	C	C	P	P
Magnetotelúrico	Resistividad	S	P	P	C	C	X	X	X	X	X
P	Método primario	1	Exploración de hidrocarburos				6	Detección de cavidades del subsuelo			
S	Método secundario	2	Estudios geológicos regionales				7	Mapeo de lixiviados y plumas contaminantes			
C	Complementario	3	Exploración de yacimientos minerales				8	Detección de cuerpos metálicos enterrados			
X	Inviabile	4	Estudios de geotecnia e ingeniería				9	Arqueogeofísica y arqueología			
		5	Estudios de aguas subterráneas				10	Geofísica forense			



CCMASTERS
EDUCATION®

Python, línea de comandos y GIT

```
0 response = requests.get(url) # load from the website
1
2 # checking response.status_code (if you get 502, try rerunning the code)
3 if response.status_code != 200:
4     print(f"Status: {response.status_code} - Try rerunning the code!")
5 else:
6     print(f"Status: {response.status_code}\n")
7
8 # using BeautifulSoup to parse the response object
9 soup = BeautifulSoup(response.content, "html.parser")
10
11 # finding Post images in the soup
12 images = soup.find_all("img", attrs={"alt": "Post image"})
13
14 # downloading images
15 count = 0
16 for image in images:
17     # ... (code for downloading images) ...
18     count += 1
```



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com

Ciencias de la Tierra y computación

Las computadoras son esenciales en la ciencia moderna

Compilar y analizar datos, preparar ilustraciones o escribir manuscritos

Ejecutar algoritmos, crear modelos predictivos, realizar simulaciones

Lenguajes de programación comunes: Python, R, Fortran

Python: orientado a objetos con un gran soporte de la comunidad





CCMASTERS
EDUCATION®

¿Por qué aprender Python?

Flexible, disponible gratuitamente y multiplataforma

Relativamente sencillo de aprender a comparación de otros lenguajes

Cuenta con variedad de paquetes numéricos, estadísticos y de visualización de datos.

Cuenta con mucha documentación en línea.



Visita Nuestro Sitio Web
www.ccmasterseducation.com

<https://www.youtube.com/montypython>



¿Qué es Git?

- Git es un sistema de control de versiones que originalmente fue diseñado para operar en un entorno Linux. Actualmente Git es multiplataforma, es decir, es compatible con Linux, MacOS y Windows.

Almacena la
información como un
conjunto de archivos

No existen cambios sin
que Git lo sepa

Casi todo en Git es
mediante recursos
locales

Git cuenta con tres
estados: Staged,
Modified y Committed





¿Y entonces qué es Github?

- GitHub es un servicio de alojamiento que ofrece a los desarrolladores repositorios de software usando el sistema de control de versiones, Git.

Permite alojar
proyectos de forma
gratuita (freemium)

Puedes compartir tus
proyectos de forma
sencilla

Permite colaborar para
mejorar los proyectos
de otros

Es la opción ideal para
trabajar en equipo en
un mismo proyecto





Instaladores

- **Python y Anaconda:**

- Python: <https://www.python.org/downloads/>
- Anaconda: <https://www.anaconda.com/download>
- Miniconda (opcional, una versión minimalista de Anaconda):
https://repo.anaconda.com/miniconda/Miniconda3-latest-Windows-x86_64.exe

- **Visual Studio Code:**

- <https://code.visualstudio.com/download>

- **Git:**

- <https://git-scm.com/download/win>

