

Métodos Indirectos para el estudio de la Tierra

1 GEOFÍSICA: MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS

FUNDAMENTACIÓN.

La base de esta metodología es la ley de gravitación universal de Newton que puede expresarse mediante la expresión siguiente:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Donde F es la fuerza, m_1 y m_2 son las masas, r la distancia que separa sus respectivos centros de masa y G la constante de la gravitación universal, cuyo valor es $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$.

Por otra parte, la segunda ley del movimiento establece que la aceleración (a) de un cuerpo de masa m_1 viene dada por la expresión:

$$F = m_1 a$$

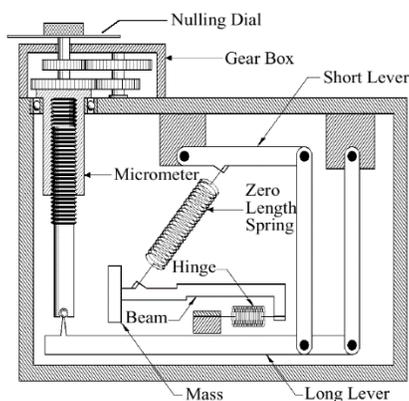
Iguando ambas expresiones, dado que la fuerza se debe a la atracción de la Tierra, se puede despejar el valor de a , que en nuestro caso se conoce como g .

$$g = G \frac{m_2}{r^2}$$

El valor estandar obtenido es de $9'78049 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$. Puesto que este valor experimenta pequeñas variaciones locales se conoce como g_0 y a las variaciones del mismo, anomalías de la gravedad.

INSTRUMENTOS.

Los instrumentos de medida se denominan gravímetros. El principio de funcionamiento se basa en una masa suspendida de un muelle. De tal forma que actúan sobre ella la fuerza elástica y la de gravedad. Aprecian variaciones de g superiores a $0,1 \text{ mgal}$ ($1 \text{ gal} = 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$).



INTERPRETACIÓN.

La correcta interpretación de las anomalías del valor de g requiere conocer las variaciones de dicho valor debidas a la latitud (el radio de la Tierra disminuye con la latitud geográfica), la altitud (la cota de emplazamiento del equipo aumenta r) y la influencia del relieve.

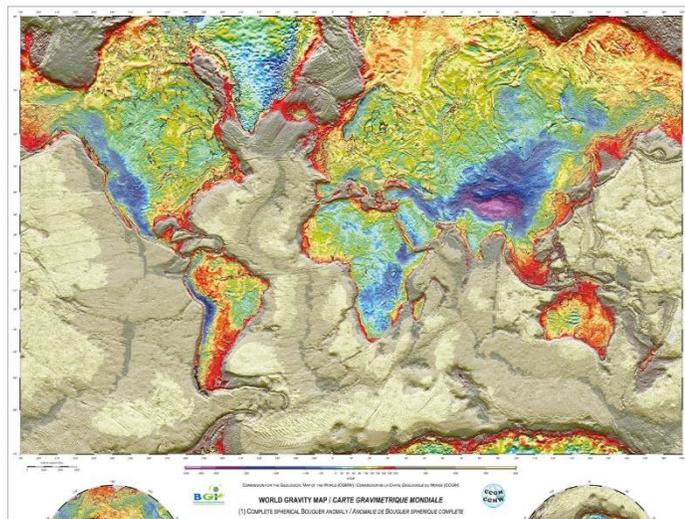
Las ecuaciones siguientes, propuestas por Bouguer nos permiten evaluar la influencia de dos de estos factores:

$$g = 978,0490(1 + 0,0052884 \text{ sen}^2\phi - 0,0000059 \text{ sen}^2\phi) \text{ gal}$$

En esta ecuación ϕ es la latitud geográfica.

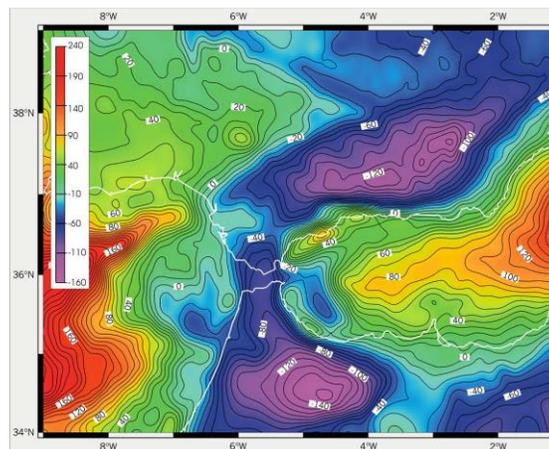
$$g = g_h + (0,3086 - 0,04191\rho)h \text{ mgal}$$

Donde ρ es la densidad, g_h la aceleración medida a una altura h y ésta la cota de emplazamiento del equipo de medida.



En esta imagen se representan las zonas del planeta, una vez corregida la influencia de la latitud, la altura y el relieve, con anomalías que muestran exceso de masa (gris) y las que muestran defecto (azul).

En la siguiente podemos ver las anomalías de la gravedad en Andalucía y norte de Marruecos.



2 GEOFÍSICA: MÉTODOS SÍSMICOS

FUNDAMENTACIÓN.

Los métodos sísmicos analizan la propagación de las ondas elásticas generadas en un seísmo o una fuente artificial. Estudian la velocidad de propagación de las ondas longitudinales y transversales y los cambios de estas asociados a modificaciones del medio en el cual se transiten (refracción, reflexión, difusión o absorción).

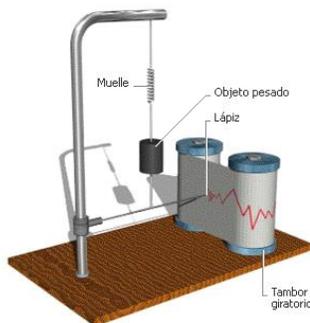
La velocidad con la que se propagan las ondas sísmicas depende del comportamiento del material y por ello, nos informan de las características del interior de la Tierra.

$$\alpha = \sqrt{\frac{K + \left(\frac{4\mu}{3}\right)}{\rho}} \quad \beta = \sqrt{\mu/\rho}$$

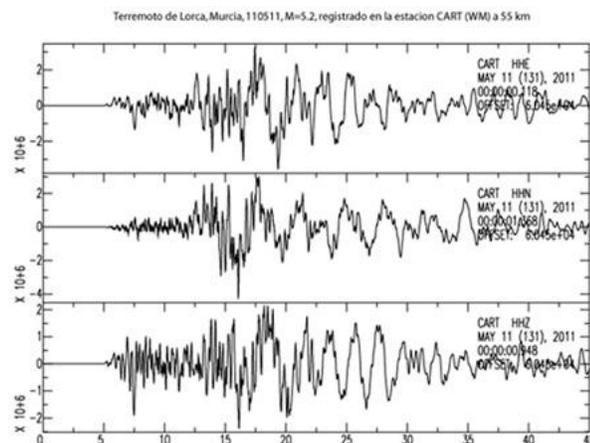
En estas ecuaciones α es la velocidad de las ondas longitudinales (P) y β la de las ondas transversales (S). Las características del material vienen determinadas por los parámetros ρ (densidad), K (módulo de incompresibilidad) y μ (módulo de rigidez).

INSTRUMENTOS Y MEDIDA.

Los equipos de medida de los seísmos se conocen con el nombre de *sismógrafos*, aunque se usan otros de dimensiones más reducidas denominados *geófonos*. Su funcionamiento, como se ilustra en la figura, consiste en una masa que es suspendida por un muelle y que oscila registrando su vibración ante un seísmo. Su registro se realiza en las tres componentes espaciales y se llama *sismograma*.



Esquema de un sismógrafo



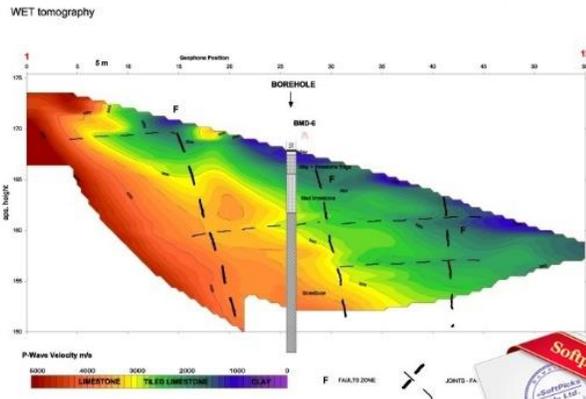
Sismograma del terremoto de Lorca de 2.011

MÉTODOS.

Existen diferentes técnicas en función del parámetro estudiado o del tipo de onda. Podemos citar algunas de las más importantes a efectos de conocer la estructura del planeta.

Sísmica de refracción.

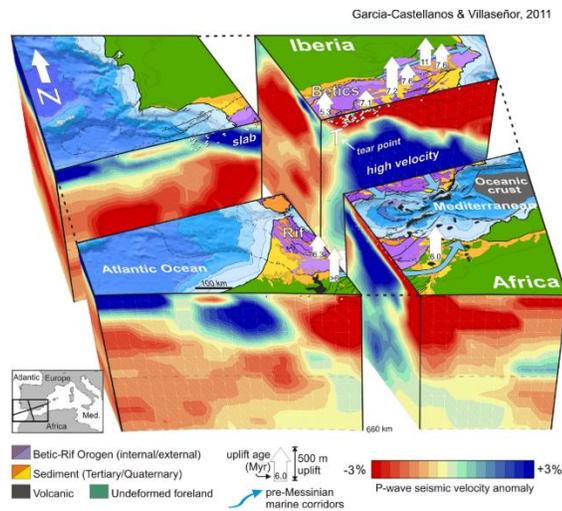
Este método se basa en determinar los tiempos de recorrido de las ondas P desde un punto conocido (fuente sísmica) hasta una serie de receptores (geófonos). Conociendo el tiempo de recorrido que las ondas P emplean en recorrer la distancia que separa la fuente y los receptores, se puede determinar la velocidad de propagación del medio situado entre ambos.



Estructuras identificadas mediante sísmica de refracción

Tomografía sísmica.

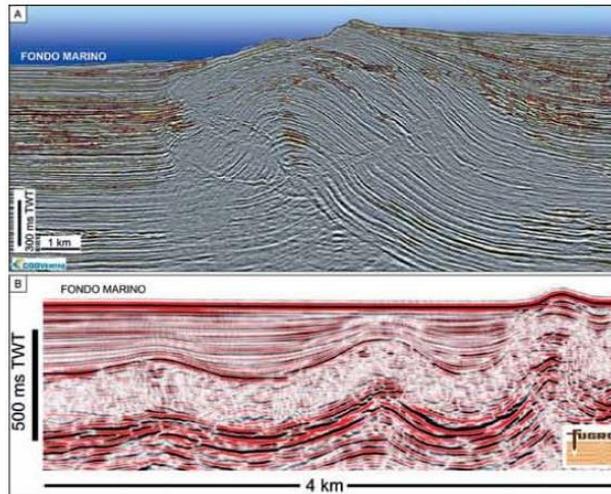
La tomografía sísmica nos permite obtener información más detallada y utiliza el cálculo de la diferencia entre tiempo de recorrido de ondas P observado y teórico para establecer la estructura del subsuelo.



Imágenes de tomografía sísmica del sur de la península Ibérica

Sísmica de reflexión.

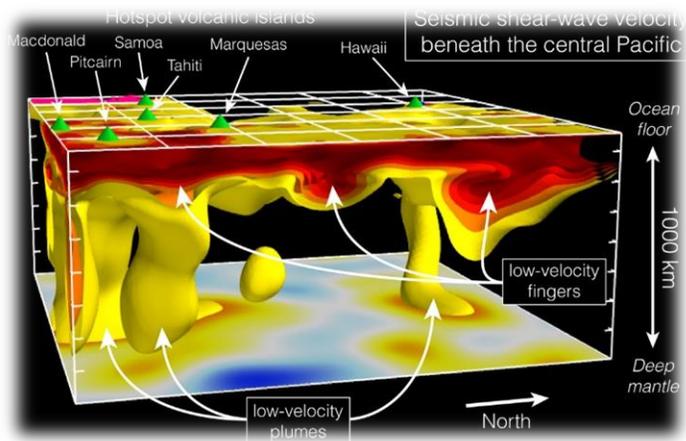
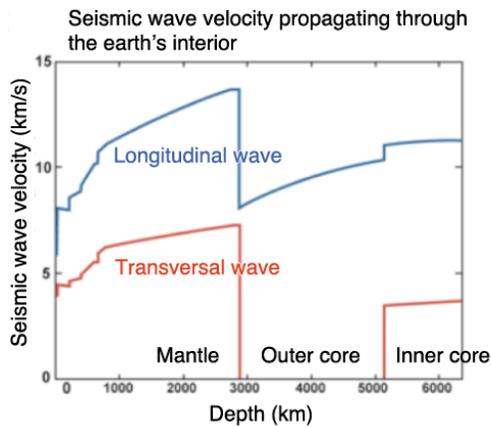
Esta técnica se basa en la detección de las ondas sísmicas que se reflejan cuando existe una discontinuidad en el subsuelo. Por ello, nos permite determinar la presencia de superficies que separan diferentes capas u otras estructuras subterráneas.



Perfiles de reflexión de la costa de Namibia

INTERPRETACIÓN.

La representación de los cambios de velocidad de las ondas sísmicas y la profundidad nos permite postular un modelo de estructura interna para la Tierra. La gráfica adjunta nos muestra la información referida y en ella se infiere la estructuración de los materiales que conforman el planeta.



En muchos casos, esta metodología nos ayuda a visualizar detalles de estructuras que nos permiten conocer la dinámica de zonas extensas del interior como se aprecia en la imagen del área volcánica del Pacífico Central.

3 GEOFÍSICA: MÉTODOS TÉRMICOS

FUNDAMENTACIÓN.

Son métodos que consideran la Tierra como una máquina térmica, en cuyo interior existe un calor interno que se desprende en forma de un *flujo geotérmico*. Estudiando la distribución geográfica de este flujo de calor, sus anomalías y sus mecanismos de disipación, se puede establecer hipótesis sobre las condiciones del interior del planeta y sobre su estructura interna.

Las fuentes de este calor se asocian, por un lado, al proceso de acreción inicial y la posterior diferenciación y por otra parte a la existencia de elementos radiactivos como el Uranio, el Torio y Potasio.

Su medida se basa en la Ley de Fourier, cuya expresión puede adoptar la forma siguiente:

$$q = -k \nabla T$$

En ella q representa el flujo de calor en $\text{w}\cdot\text{m}^{-2}$, k la conductividad térmica del material y T la variación de temperatura en $^{\circ}\text{K}$. Las medidas efectuadas en la Tierra nos han proporcionado valores medios de $60 \text{ mW}\cdot\text{s}^{-2}$ en zonas continentales, aunque en áreas continentales antiguas este valor alcanza $30 \text{ mW}\cdot\text{s}^{-2}$, mientras que en zonas oceánicas puede alcanzar los $120 \text{ mW}\cdot\text{s}^{-2}$. Dependiendo de mecanismo de transferencia de calor podemos adaptar la ecuación de Fourier a las expresiones diferentes:

Conducción

$$q = \frac{kA(\nabla T)}{L}$$

Convección

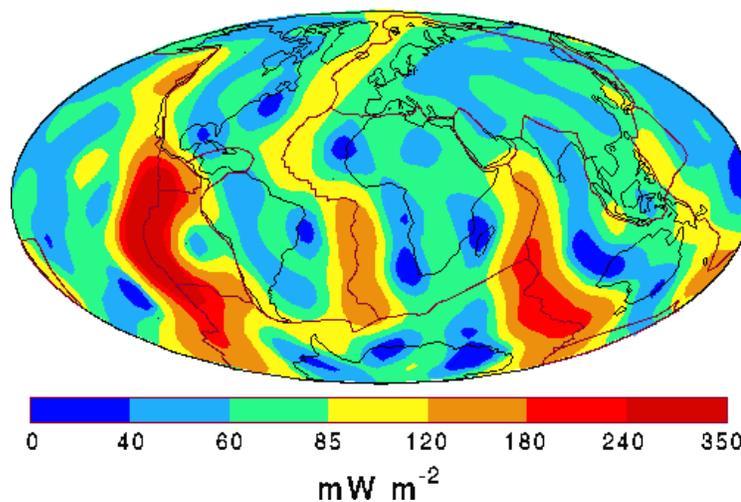
$$q = h A(\nabla T)$$

Radiación

$$q = A(\epsilon\alpha T^4)$$

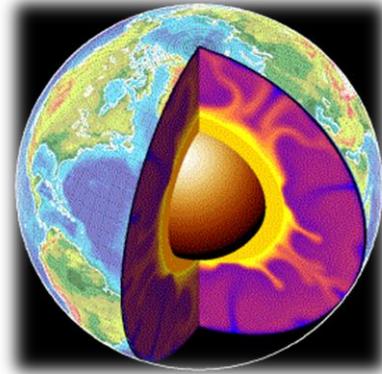
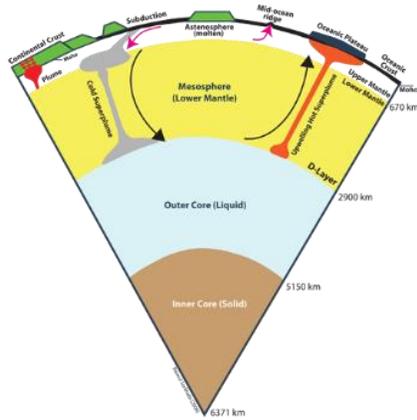
INTERPRETACIÓN

Como se puede apreciar en la imagen, existe una distribución de las áreas de mayor flujo térmico asociada a las dorsales oceánicas donde el grosor de la corteza es menor.



Tomando en consideración los datos, el mecanismo de transferencia de calor y los valores de conductividad térmica de las rocas podemos establecer la naturaleza de las capas de la Tierra y sus

espesores. También se proponen modelos geodinámicos del interior del planeta como los que se ilustran en las imágenes siguientes.

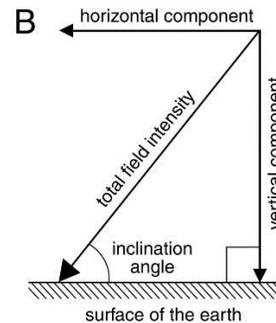
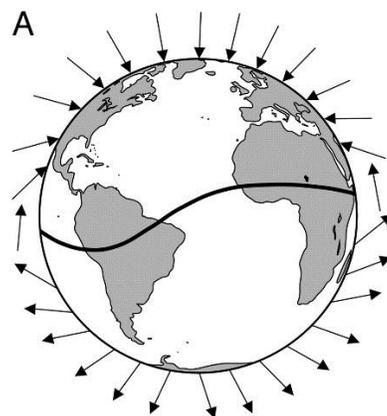


4 GEOFÍSICA: MÉTODOS MAGNÉTICOS

FUNDAMENTACIÓN.

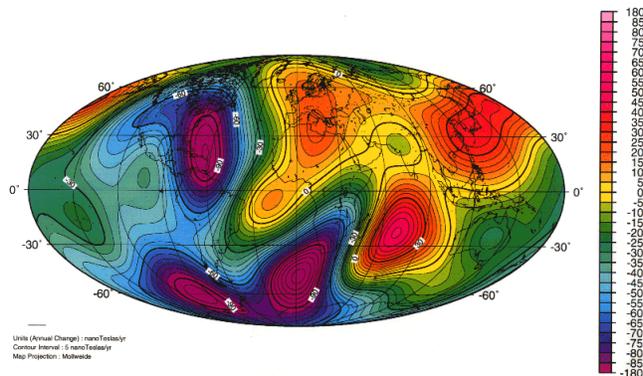
El campo geomagnético y sus variaciones en el tiempo son nuestro modo más directo de estudiar la dinámica del núcleo. Las variaciones del campo geomagnético con el tiempo son la base para la ciencia del paleomagnetismo y de nuevos descubrimientos que dieron un importante impulso al concepto de tectónica de placas.

Las fuentes del campo magnético son de tipo endógeno y externo. Por un lado existe una magnetización permanente en la Corteza, como evidencia la existente en las rocas antiguas de minerales orientados a diferentes *campos paleomagnéticos*. Por otra parte, en el núcleo externo, de composición metálica (Fe) y elevada viscosidad se ha constatado compleja circulación convectiva rápida (10 Km/año) que genera una *dinamo* y con ello, un campo dipolar.

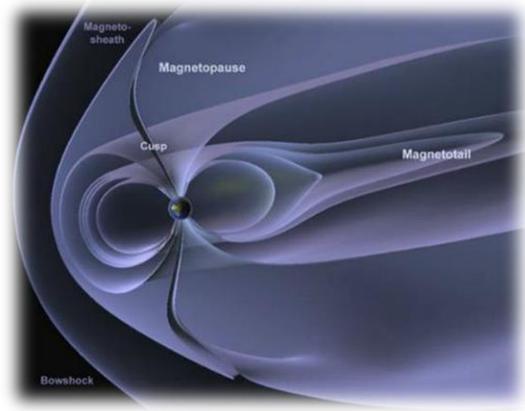


El 90% del campo magnético puede ser descrito en superficie como un dipolo inclinado 11° respecto al eje de rotación de forma que sus polos se sitúan en Groenlandia ($78.5N/70W$) y ($75.5S/110E$). Esta diferencia con el polo geográfico se conoce como *declinación*. El 10% restante tiene una naturaleza

no polar y se justifica con fuentes externas. La amplitud varía de 60.000 nT en los polos a 25.000 nT en el ecuador magnético. Pero el campo geomagnético está sujeto a variaciones seculares que afectan a la declinación, inclinación e intensidad.



En la imagen de la izquierda podemos ver la variación de la intensidad de campo en nanotesla (nT). Mientras que en el mapa de la península se representan los valores de declinación del año 2005.



El campo de génesis interna interactúa con las partículas del viento solar y los gases de la Ionosfera y determina una compleja morfología como la que se ilustra en la figura. En ella apreciamos la deformación de las superficies equipotenciales por efecto del viento solar.

INTERPRETACIÓN.



Los estudios de la variación secular nos informan sobre la geodinámica del Núcleo terrestre. Fenómenos como la rotación diferencial entre el Manto y el Núcleo y la convección en el Núcleo Externo pueden ser analizados mediante el estudio de dichas variaciones.

Las investigaciones desarrolladas sobre el magnetismo fósil presente en minerales como la Ilmenita, Magnetita o Hematitas nos ha permitido articular la teoría de la Tectónica de Placas y nos muestra cambios muy importantes en el pasado geológico de la Magnetosfera.

También se pueden establecer estructuras del subsuelo mediante la medida de las modificaciones que algunas rocas producen en el campo magnético. En este caso se utilizan magnetómetros que registran pequeñas variaciones de la intensidad de campo en gauss (1 gauss = 10.000 nT).

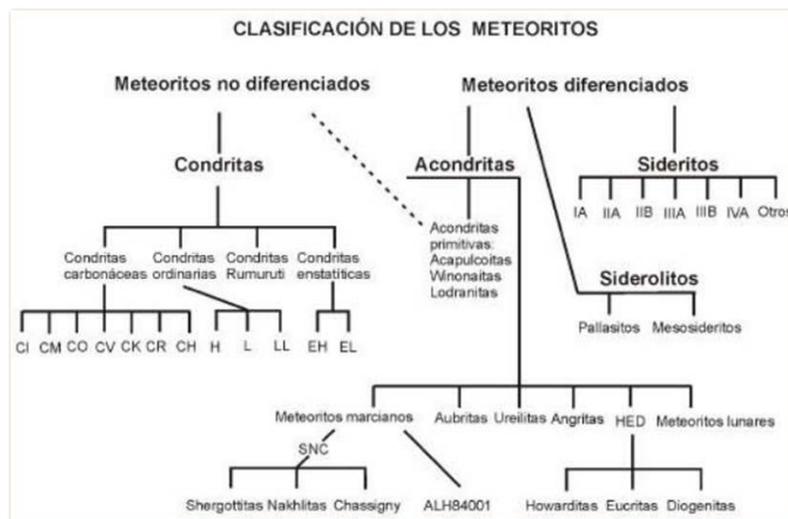
5 GEOQUÍMICA: ESTUDIO DE LOS METEORITOS

LOS METEORITOS.



En nuestro planeta impactan gran número de fragmentos rocosos que denominamos meteoritos. La mayoría son pequeños y se desintegran debido a las altas temperaturas de la Termosfera y de la fricción con los gases de la atmósfera. Pero algunos son colisionan sobre la superficie terrestre como el de la imagen (Cráter Barringer en Arizona).

Desde hace tiempo el ser humano se ha interesado por ellos y ha intentado conocer su origen. Actualmente clasifican por su composición y por la evidencia de procesos de diferenciación geoquímica. Podemos tomar en consideración la clasificación que se muestra:



Las condritas y acondritas son las más frecuentes, están formadas por silicatos y su densidad es $2,4 \text{ g/cm}^3$. Los sideritos están formados por metales, fundamentalmente hierro y su densidad es muy alta, más de $7,5 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, los siderolitos tienen una composición intermedia y una densidad aproximada de 5 g/cm^3 .

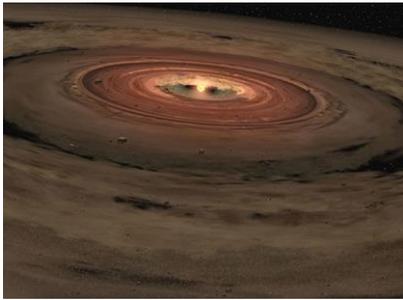
EL CINTURON DE ASTEROIDES



Actualmente sabemos que la procedencia de los meteoritos es, al margen de Marte, el cinturón de asteroides. Por ello su composición refleja la del cinturón. Si admitimos que son el resultado de un planeta rocoso que no se formó como consecuencia de la influencia gravitacional de Júpiter podemos asumir que la composición de los asteroides es similar a la de la Tierra y por ende, la composición de los meteoritos nos informa

sobre la geoquímica de nuestro planeta.

HIPÓTESIS PLANETESIMAL DEL ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR.

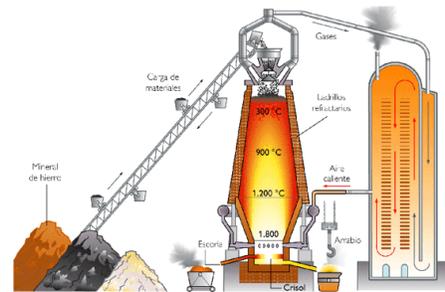


De acuerdo con los planteamientos de esta hipótesis el origen del sistema solar se asocia a la contracción de una nube de polvo y gas por efecto de la gravedad. Dicho proceso se iniciaría hace más de 4.600 millones de años y formaría una gran masa central. Como consecuencia de la explosión de una supernova cercana la materia comenzó a girar conformando un disco giratorio en torno a la zona central.

La presión de la masa central que se alcanzarían temperaturas tan elevadas como para iniciar procesos de fusión del Hidrógeno, formando una estrella, el protosol. En el disco protoplanetario se definían algunos remolinos o regiones en las que se concentraba más materiales como consecuencia de muchas colisiones de partículas de polvo y gas. Éstas se agrupaban creando gránulos de algunos milímetros de cuyas colisiones se originaron cuerpos mayores conocidos como planetesimales. La acreción de éstos daría paso a protoplanetas. El proceso prosiguió y en unos cientos de millones de años el sistema solar adoptaría un aspecto semejante al actual.

6 GEOQUÍMICA: EXPERIENCIA DE V. GOLDSCHMIDT

Las experiencias de Goldschmidt nos pueden ayudar para plantear una hipótesis sobre la composición interna de nuestro planeta. Él preparó una mezcla similar a la composición media de los meteoritos y la fundió en un alto horno. Observó que los distintos componentes se concentraban en capas atendiendo a su densidad y comportamiento geoquímico. De esta forma, comprobó que se conformaban cuatro capas diferentes que denominó: siderosfera, calcosfera, litosfera y atmósfera. En la tabla se relacionan los elementos más comunes en función de la capa en la que se concentran mayoritariamente.



En la tabla se relacionan los elementos más comunes en función de la capa en la que se concentran mayoritariamente.

Capa	Siderosfera	Calcosfera	Litosfera	Atmósfera
Elemento	Mn, Fe, Co, Ni, Mo, Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt, Au	S, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Hg, Tl, Pb, Bi, Po	Li, Be, B, O, F, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Ni, I, Cs, Ba, Fr, Ra...	H, C, N, He, Ne, Ar, Kr, Xe, Rn

Hoy en día esta es la base para proponer modelos composicionales de las estructuras que los diferentes métodos identifican. La siderosfera se identifica con el Núcleo metálico y la Calcosfera con el Manto. Pero la actual Litosfera responde a una concepción mecánica y no geoquímica. Por ello, no se debe asociar el término propuesto por Goldschmidt ni a la corteza ni a la litosfera, definida ésta como capa rígida y frágil.