

TEMA 3.1: ESTRUCTURA y DINÁMICA DE LA TIERRA

1. LA CIENCIA DE LA GEOLOGÍA
2. LOS SISTEMAS TERRESTRES
3. LA ATMÓSFERA
4. LA HIDROSFERA
5. ESTRUCTURA INTERNA DE LA GEOSFERA
6. FIJISMO Y MOVILISMO
7. LA TECTÓNICA DE PLACAS
8. LA DINÁMICA DE LAS CAPAS INTERNAS TERRESTRES



“The blue marble”, fotografía obtenida por la tripulación del Apolo 17 el 7 de diciembre de 1972. FOTO: NASA

1- LA CIENCIA DE LA GEOLOGÍA

La **geología** es la ciencia que estudia la estructura, dinámica e historia del planeta Tierra. Se divide en dos grandes ramas: la **geología física**, que estudia la estructura, composición y dinámica de la Tierra, y la **geología histórica**, que estudia su origen y su evolución. Últimamente se define una tercera rama, la **geología planetaria**, referida a otros cuerpos del sistema solar. La utilidad de la geología se puede expresar a través de los siguientes objetivos:

- El **conocimiento científico** sobre la estructura de la Tierra y los procesos que tienen lugar en ella.
- La prospección de **recursos geológicos** materiales (minerales y agua) y energéticos (combustibles fósiles y energías renovables).
- La previsión de **riesgos geológicos** internos (volcanes, terremotos, tsunamis) o externos (deslizamientos, inundaciones, aludes).
- El conocimiento y **evaluación de las características del substrato** a la hora de realizar obras públicas (infraestructuras y edificaciones).

En realidad, la geología es un cúmulo de disciplinas especializadas en distintos objetos de estudio:

- Los materiales terrestres: **mineralogía, petrología, cristalografía.**
- Los parámetros físicos de la Tierra: **geofísica.**
- La dinámica terrestre (**Geodinámica**), tanto interna (**tectónica, vulcanismo, sismología**) como externa (**glaciología, geomorfología, edafología**).
- La geología histórica: **Paleontología, estratigrafía.**
- La geología planetaria.
- La aplicación de conocimiento generado en las distintas Ciencias geológicas: **Hidrogeología, geología del petróleo, geotécnica, minería, cantería, geología ambiental, etc.**

La visión sintética (*holística* en términos más precisos) e interdisciplinar propia del actual siglo XXI, ha generado una nueva denominación genérica de las ciencias geológicas, que sería de las siguientes maneras:

1. **Ciencias de la Tierra:** integración de las ciencias geológicas con otras disciplinas científicas (oceanografía, física atmosférica, ecología) para contribuir así a una visión sintética de la dinámica terrestre. Se contemplan cuatro subsistemas: geosfera, atmósfera, hidrosfera y biosfera.
2. **Ciencias medioambientales:** Se trata de una disciplina de síntesis, que recoge e integra aportes de las Ciencias de la Naturaleza (Biología, Ecología, Geología, Física y Química) y las Ciencias Sociales (Geografía, Historia, Economía, Derecho, Política).

1.1 LOS MÉTODOS DIRECTOS

Los **métodos directos** de estudio de la Tierra están limitados a las capas más superficiales de la corteza terrestre. Se incluyen los siguientes:

- Observación directa de materiales (rocas, minerales, emisiones gaseosas, etc) y estructuras (estratos, fallas, pliegues) presentes en la superficie terrestre, tanto de origen externo como interno. En este último caso, su interpretación permite estudiar los procesos que se producen en el interior de la corteza.
- Estudio de los volcanes y análisis de los materiales que expulsan: también permiten conocer la dinámica cortical.

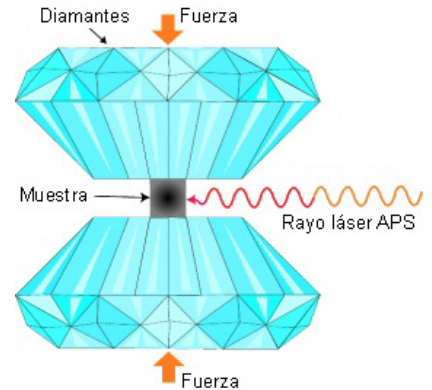
- Observación directa del interior terrestre a través de **minas** profundas (más de 3 km) o **sondeos** (hasta 13 km). Muy limitado por las dificultades técnicas y los elevados costes.

1.2 LOS MÉTODOS INDIRECTOS

Los **métodos indirectos** de estudio de la Tierra permiten obtener información de materiales no accesibles y así deducir la naturaleza y dinámica de las capas más internas.

En el laboratorio se pueden realizar **simulaciones** mediante la reproducción a pequeña escala los procesos que suceden en lugares del interior terrestre. Un ejemplo es el yunque de diamante, que permite modelizar las condiciones del manto terrestre y poder comprobar cómo cambian las propiedades de sus minerales con la presión.

Por otra parte, el estudio de los **meteoritos** que llegan a nuestro planeta del exterior, al considerarse fragmentos de planetas rocosos que no completaron el proceso de acreción, permite deducir por analogía la composición de las capas profundas de la Tierra. De este modo, las **condritas**, formadas por silicatos, tienen una composición parecida a la corteza terrestre, mientras que los **sideritos**, formados por una aleación de hierro y níquel, deberían tener una composición parecida a la de las capas más internas.



Las fases del estudio geológico:

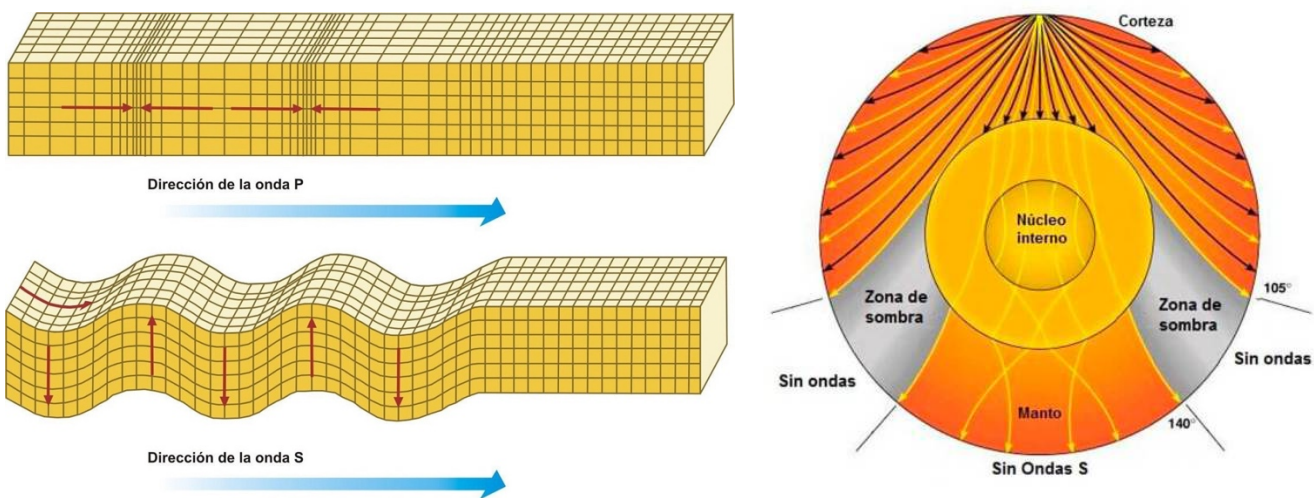
1. **Investigación bibliográfica** (libros, revistas, mapas, fotografías) durante el diseño del proyecto de investigación con el objetivo de documentarse y de saber el grado de conocimiento del objeto a estudiar.
2. **Trabajo de campo**, que se realiza sobre el terreno, lo que implica el desplazamiento a la zona de estudio mediante campañas o expediciones. En ocasiones las zonas de estudio son muy remotas, lo que obliga al uso de buques oceanográficos o de bases científicas. El trabajo tiene las siguientes finalidades:
 - **Observación directa** del terreno mediante lupas, prismáticos y cámara de fotos o de vídeo.
 - **Obtención de datos** que se anotan en un cuaderno de campo, utilizando instrumentos como el calibre (tamaño de objetos pequeños), la brújula (orientación), el G.P.S. (posición), el clinómetro (inclinación), el termómetro, etc
 - **Obtención de muestras** de minerales, rocas, fósiles o suelos, utilizando para ello el martillo de geólogo, la piqueta y el cincel, y almacenándolas en bolsas y tubos convenientemente etiquetados (lugar, fecha y demás información relevante).

En investigaciones en profundidad se realizan **sondeos**, es decir, perforaciones con la intención de obtener testigos de roca para su posterior estudio, o introducir equipos de medida con los instrumentos adecuados para la medición de parámetros como conductividad eléctrica, temperatura, transmisión de ondas, emisión radiactiva, etc.

3. **Trabajo de laboratorio**, en donde se analizan las muestras obtenidas en el trabajo de campo mediante:
 - La **observación** de *visu*, al microscopio o a la lupa binocular. El **microscopio petrográfico** utiliza luz polarizada y permite identificar y estudiar los minerales de una roca. Como la luz tiene que atravesar la muestra, ésta tiene que estar finamente cortada mediante una sierra de diamante.
 - El **análisis químico** para identificar minerales (que son compuestos químicos) o elementos químicos o isótopos que contienen. Para esto último se tiene que usar instrumentos sofisticados como el **espectrógrafo de masas**. El **difractor de rayos X** se utiliza para conocer la estructura cristalina de los minerales.
 - Análisis de **parámetros geofísicos** especialmente importantes como métodos indirectos de estudio, como paleomagnetismo (magnetómetros), ondas sísmicas (sismógrafos), anomalías gravimétricas (gravímetros), ondas sonoras (geófonos), etc.
 - **Ensayos de laboratorio**, en que se reproducen de manera aproximada las condiciones físicas de zonas remotas o inaccesibles (interior terrestre) y se observa lo que ocurre.
4. **Trabajo de despacho**, en que se realiza un análisis y estudio de los datos obtenidos en el campo y en el laboratorio utilizando imágenes aéreas o de satélite y la cartografía del área de estudio. A continuación, con la importante consulta de la bibliografía, se elaboran las **conclusiones** y se **publican** los resultados (en una revista científica o mediante un mapa) para darlos a conocer a la comunidad científica.

Los más utilizados son sin duda los métodos de **prospección geofísica**, consistentes en la observación y el estudio de las manifestaciones de la energía de la Tierra. De entre ellas, el más relevante es el estudio, gracias a la red mundial de sismógrafos, de la propagación de las **ondas sísmicas** generadas por pequeñas explosiones provocadas o por terremotos de gran magnitud. Como pueden recorrer las capas más internas de la Tierra, revelan una información muy valiosa sobre su estructura y su composición.

De este modo, se han detectado superficies de separación de materiales de distinta composición y estado físico, en donde las ondas sísmicas cambian bruscamente de dirección (por reflexión o refracción) y de velocidad. Estas superficies son las **discontinuidades sísmicas** y separan las distintas capas y subcapas que define el modelo geoquímico de la estructura interna terrestre. Las ondas sísmicas que pueden recorrer el interior terrestre son las **ondas primarias P** (de compresión longitudinal y capaces de propagarse por sólidos y líquidos) y las **ondas secundarias S** (más lentas, de oscilación transversal y que sólo se propagan por materiales sólidos).



De este modo, entre otros descubrimientos, se detectó para cada terremoto una zona de sombra (sin llegada de ondas sísmicas de ningún tipo) a una distancia de entre 103° y 142° de su hipocentro. Esto se corresponde con la presencia de materiales en estado líquido a partir de 2.900 km de profundidad, en donde las ondas S no se propagan y las P experimentan una fuerte refracción.

Existen otros métodos de prospección que han dado información que complementa la obtenida mediante métodos sísmicos. Son los siguientes:

- **Gravimétricos:** detectan pequeñas variaciones del campo gravitatorio terrestre debido a la heterogeneidad de la distribución de las masas rocosas en el interior terrestre. Con los gravímetros se miden estas anomalías, que pueden ser positivas (valor de g mayor de lo normal, establecido en $9,81 \text{ m/s}^2$) o negativas (valor inferior al esperado). Las anomalías gravimétricas positivas delatan la presencia de materiales de mayor densidad (rocas básicas, minerales metálicos, etc) y las negativas, en cambio, permiten deducir la presencia de materiales de menor densidad (rocas ácidas, sedimentos, etc).
- **Magnéticos,** mediante el uso de magnetómetros se detectan variaciones en la dirección e intensidad del campo magnético sobre unos valores medios. Estas anomalías suelen indicar la presencia de acuíferos o materiales metálicos. Por otra parte, la mera existencia de un campo magnético terrestre apoya la idea de un núcleo metálico en permanente agitación.
- Los métodos **térmicos** utilizan parámetros relacionados con el calor interno terrestre como el **gradiente geotérmico** (aumento no lineal de la temperatura de los materiales

con la profundidad) y el **flujo geotérmico** (calor que emite la superficie terrestre por unidad de superficie y tiempo, parámetro que además es varía entre regiones). La interpretación de estos datos nos permite deducir la temperatura y la dinámica de las capas internas.

- A través de la ley de gravitación universal se puede calcular la masa de la Tierra y su **densidad media**. El valor de $5,52 \text{ g/cm}^3$ contrasta con el valor medio de las rocas de la corteza continental ($2,7 \text{ g/cm}^3$) y de la oceánica (3 g/cm^3), por lo que los materiales del interior terrestre tendrán que ser más densos. Esta idea apoya de nuevo la existencia en la Tierra de un núcleo metálico formado fundamentalmente por hierro, cuya densidad se sitúa por encima de la media

2- LOS SISTEMAS TERRESTRES

Los **sistemas** son conjuntos de elementos o componentes y las relaciones entre ellos, consistentes en el intercambio o trasvase de energía, materia o información. Según esta definición, en la Tierra operarían cuatro grandes sistemas que interaccionan entre sí. Éstos son las siguientes:

1. **Geosfera**: componente o capa rocosa, cuya porción de mayor interés e influencia es la Litosfera.
2. **Atmósfera**: capa externa y gaseosa.
3. **Hidrosfera**: capa discontinua de agua que cubre la superficie terrestre.
4. **Ecosfera**: capa o sistema que integra todos los seres vivos (la **biosfera**), el medio físico en que habitan y el conjunto de relaciones que se dan entre ellos. Es en definitiva la parte de la Tierra donde existe vida sin apoyo artificial. Está inmiscuida en las otras capas o subsistemas (parte inferior de la atmósfera y partes superiores de litosfera e hidrosfera) y sus límites son difíciles de definir.

Todos los componentes de los sistemas terrestres se relacionan de una u otra forma en un equilibrio dinámico, de manera que el cambio en un sistema repercute sobre los demás. Las interrelaciones de estos subsistemas se ven reflejadas en varios ejemplos como el **sistema climático**, los **ciclos biogeoquímicos**, el **ciclo del agua**, y la existencia de interfases como los **suelos** y el **litoral**.

3- LA ATMÓSFERA

La **atmósfera** es la capa gaseosa que envuelve un planeta. Se compone de una mezcla de gases que se conoce como **aire**, que contiene básicamente los gases que se reflejan en la siguiente tabla:

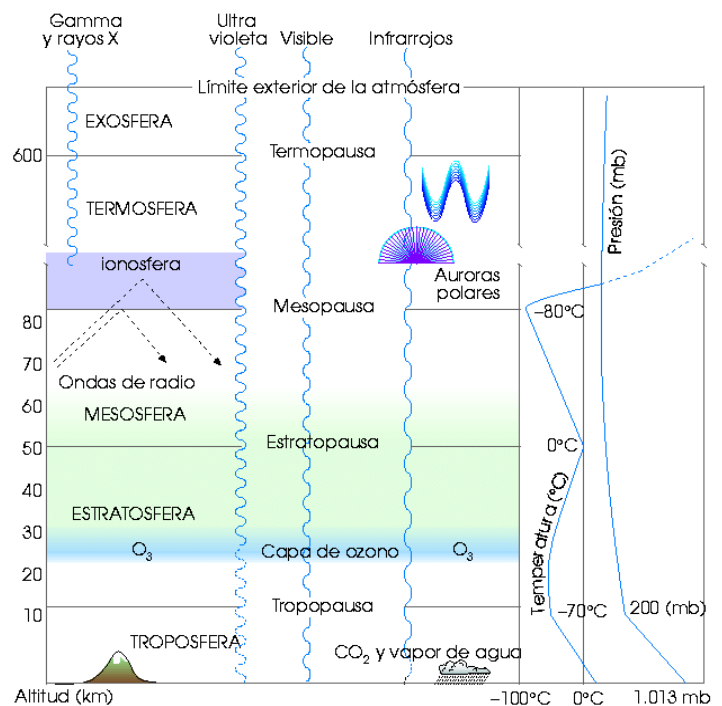
| Gas | Cantidad | Función |
|--|------------------|---|
| Nitrógeno (N_2) | 78% | Inerte muy poco reactivo. |
| Oxígeno (O_2) | 20,9% | Respiración celular y meteorización química por oxidación. |
| Argón (Ar) | 0,93% | Gas noble muy estable e inerte. |
| Dióxido de carbono (CO_2) | 0,03% | Responsable del efecto invernadero natural y reactivo de la fotosíntesis. |
| Vapor de agua (H_2O) | Variable (0-4 %) | Interviene en el ciclo hidrológico. |

Además del aire, se puede encontrar partículas sólidas o líquidas en forma de aerosoles como como agua sólida o líquida (formando las nubes), partículas de polvo o de sal, humos y cenizas, o sustancias de origen biológico como microorganismos, polen y esporas.

3.1 LA ESTRUCTURA VERTICAL DE LA ATMÓSFERA

El límite superior de la atmósfera terrestre es poco preciso: se toma como media 10.000 km, aunque algunos autores lo elevan hasta 30.000 km. En cuanto a su estructura, se definen varias capas diferenciadas en cuanto a la temperatura:

1. La **troposfera** (de 0 a 12 km. de media) abarca desde la superficie terrestre hasta la **tropopausa**. Es la capa donde se desarrollan los seres vivos y contiene aproximadamente el 80% de la masa total del aire y de todo el vapor de agua y el polvo en suspensión. Allí se producen los **fenómenos meteorológicos** (nubes, precipitaciones, viento, etc) y el **efecto invernadero**. Tanto la presión como la temperatura disminuyen con la altura.
2. La **estratosfera** (de 12 a 50 km, de la tropopausa hasta la **estratopausa**) se denomina así porque solo existen movimientos horizontales (por estratos). Contiene la capa de ozono, con alta concentración de este gas y responsable de la absorción de la mayoría de los rayos ultravioleta.
3. La **mesosfera** abarca de 50 a 80 km (de la estratopausa hasta la **mesopausa**). Se produce la desintegración de los meteoritos procedentes del espacio al rozar con las partículas del aire, constituyendo las **estrellas fugaces**.
4. La **termosfera** abarca de 80 a 500 km (la **termopausa**) y tiene una composición distinta a la del aire (con N₂ O atómico) o H₂). Se produce la filtración de rayos X y gamma del sol, lo que hace elevar drásticamente las temperaturas. Por otra parte, las partículas se excitan y ceden un electrón, por lo que se ionizan formando la **ionosfera**. En zonas polares, estos átomos ionizados interaccionan con las partículas subatómicas solares para generar unos fenómenos luminosos denominados **auroras boreales**.
5. La **exosfera** es la capa exterior, que se extiende a partir de los 500 km. La presión de los gases es similar a la del gas interplanetario.



3.2 FUNCIÓN PROTECTORA Y REGULADORA DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera, mediante las partículas de los gases que la componen, actúa de filtro ante determinadas radiaciones de alta energía que producen efectos nocivos en los seres vivos. Esta acción protectora se realiza a tres niveles:

1. En la **termosfera** se produce la absorción de **rayos gamma** y **rayos X** (ambos de onda corta y alta energía) por las partículas de N₂ y H₂.
2. En la **mesosfera** no hay absorción de radiación, pero se produce la desintegración de casi todos los meteoritos, evitando que impacten contra la superficie terrestre.

3. En la **estratosfera** hay una absorción de los **rayos ultravioleta C, B** y parte del **A** (el 90 %) por parte de la capa de ozono situada entre 20 y 30 km.

Por otra parte, la atmósfera terrestre realiza una función reguladora de la temperatura a causa de tres fenómenos:

1. El **albedo** es la reflexión de la luz solar por parte de la superficie terrestre. Su incremento genera enfriamiento y va a depender del tipo de superficie terrestre (bajo en mares y selvas; alto en desiertos, arena y casquetes polares) y de la presencia de nubes o de polvo en suspensión.
2. El **efecto invernadero natural**, consistente en que los gases invernadero (el vapor de H₂O, CO₂, O₃ y CH₄) absorben parte de la radiación infrarroja que la Tierra reemite al espacio exterior. Esto produce un incremento en 33° C de la temperatura media terrestre (de -18 a 15 ° C)., lo que permite la existencia de agua líquida.
3. La **redistribución de la energía solar** de las zonas que son más calentadas por la radiación solar (el ecuador) hacia las zonas que están a una menor temperatura (los polos). Esto origina una circulación general del aire en la atmósfera (también del agua en la hidrosfera) que, a su vez, genera los fenómenos meteorológicos que configuran el clima.

4- LA HIDROSFERA

La **hidrosfera** es la capa discontinua de agua que recubre la mayor parte de la superficie terrestre. Consta de agua los estados líquido y sólido, puesto que el vapor de agua sólo forma parte de la atmósfera. La distribución del total del volumen de agua sería la siguiente:

| LOCALIZACIÓN | VOLUMEN (x 10 ⁶ km ³) | % del total | % del total de agua continental | Tasa de renovación |
|---------------------|---|-------------|------------------------------------|--------------------|
| Mares y océanos | 1350 | 97,2 | | 3.100 años |
| Glaciares | 29,2 | 2,2 | 77,2 | 15.000 años |
| Aguas subterráneas | 8,4 | 0,62 | 22,2 | 300 años |
| Aguas superficiales | 0,23 | 0,017 | 0,35 | 12 días |
| <i>Atmósfera</i> | 0,013 | 0,001 | 0,04 | 9 días |
| <i>Biosfera</i> | 0,0006 | 0,00005 | 0,002 | |

En el agua suelen encontrarse sustancias en disolución o suspensión como iones salinos, gases procedentes del aire, sustancias orgánicas o microorganismos y sustancias en suspensión procedentes de la erosión de rocas o suelos.

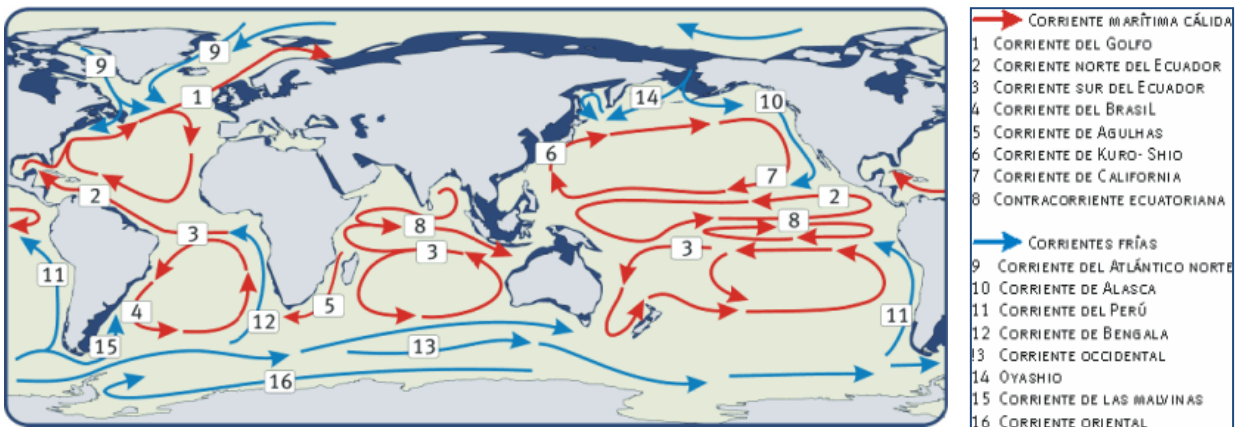
4.1 LAS AGUAS OCEÁNICAS

Las aguas de océanos y mares tienen una elevada salinidad y ocupan casi las tres cuartas partes de la superficie terrestre. Se encuentran en continuo movimiento debido a la presencia de los siguientes fenómenos:

- 1- Las **olas** son movimientos ondulatorios de las partículas de agua, generados por el viento, aunque también, en menor medida, por movimientos sísmicos o vulcanismo submarino (**tsunamis**). La acción erosiva y transportadora de las olas genera el modelado costero.
- 2- Las **mareas** son variaciones periódicas del nivel del mar, habiendo un flujo o avance de agua hacia el continente durante la **pleamar** y un reflujó o retirada de las aguas durante la **bajamar**. Estas subidas y bajadas del nivel del mar tienen gran influencia sobre los ecosistemas costeros, además de aumentar el campo de acción erosivo de las olas. El

origen de las mareas está en la atracción gravitatoria de la hidrosfera por parte de la Luna y el Sol. La Luna, al estar más cerca de la Tierra, es responsable de los ascensos y descensos del nivel del mar, mientras que el Sol únicamente modifica la intensidad de estos movimientos.

- 3- Las **corrientes marinas** son flujos persistentes de agua que pueden ser **superficiales** (generados por los vientos dominantes al barrer la superficie oceánica) o **profundas** (originadas por las diferencias de densidad entre masas de agua a causa de variaciones de temperatura y salinidad). Ambos tipos de corrientes tienen un importante papel en la redistribución de calor que recibe la Tierra. Por ejemplo, las corrientes cálidas tropicales suavizan climas templados y polares, mientras que las corrientes frías polares atemperan las costas tropicales.



4.2 LAS AGUAS CONTINENTALES

El agua presente en los continentes presenta una salinidad más variada, por lo que pueden ser: **dulces** (menos de 0,2 g/l), **salobres** (entre 0,2 y 17 g/l) y **saladas**: (más de 17 g/l). Se puede presentar en las siguientes formas:

- 1- Las **aguas subterráneas** se acumulan en el subsuelo (ocupando los poros de la roca) en forma de **acuíferos** gracias a un proceso de infiltración de aguas superficiales en un terreno permeable. Pueden discurrir por el subsuelo y salir a la superficie terrestre por un proceso de afloramiento.
- 2- Los **ríos** son corrientes continuas de agua superficial que discurren por un cauce más o menos fijo. El agua de arroyada, la fusión de la nieve o de los glaciares y el agua que aflora de los acuíferos van a parar con el tiempo a un curso fluvial, que vierte al mar o a una cuenca cerrada. El caudal es el volumen de agua que discurre por un río y puede ser variable.
- 3- Los **lagos** son acumulaciones permanentes o semipermanentes de agua dulce o salada, que ocupan depresiones de la superficie continental. Se alimentan de aportes de ríos, fusión de nieve y hielo, aguas de escorrentía, lluvia o afloramiento de aguas subterráneas. La salida de agua se realiza mediante un **emisario**, superficial o subterráneo, que hace de desagüe (salvo en cuencas endorreicas áridas).
- 4- Los **glaciares** son acumulaciones de hielo que pueden alcanzar varios kilómetros de espesor. Se generan por la acumulación de nieve, que por presión se compacta gradualmente para formar neviza primero y hielo después. Existen fundamentalmente dos tipos de glaciares: **alpinos** (en zonas montañosas) o **casquetes polares** o **inlandsis** (en zonas polares). Junto con las banquisas (superficie del mar congelada), los glaciares forman parte de la **criosfera** (conjunto de hielo del planeta).

5- LA ESTRUCTURA INTERNA DE LA GEOSFERA

La **Geosfera** es la parte rocosa del planeta Tierra, localizada bajo la corteza sólida y cuya superficie constituye el relieve. La **estructura interna** de la geosfera no es homogénea y presenta capas de distintas características. En función de éstas, se definen dos modelos: geoquímico y dinámico.

5.1- EL MODELO GEOQUÍMICO

El criterio que utiliza es la composición **química**. Las distintas capas y subcapas que se definen en este modelo están separadas por **discontinuidades sísmicas**, que son las zonas en que las ondas sísmicas generadas por los terremotos cambian su velocidad y trayectoria a causa de las distintas propiedades de los materiales que atraviesan.

1. La **corteza** es la capa sólida y delgada que se encuentra en la posición externa de la geosfera (hasta 6 ó 70 km de profundidad, dependiendo de la zona). Está separada del manto por la discontinuidad de **Mohorovicic** y se divide en dos partes: corteza **continental** y corteza **oceánica**, diferenciadas en las siguientes características:

| | ESPESOR | COMPOSICIÓN (litológica y química) | ESTRUCTURA | DENSIDAD | EDAD |
|---|--------------------------|---|---|--|---|
| CONTINENTAL (áreas emergidas y plataformas continentales) | Grande (30 a 70 km.) | Rocas ígneas (granito sobre todo). Rocas metamórficas Rocas sedimentarias <i>Silicatos de Al</i> | Heterogénea: sin capas, abundando las rocas sedimentarias en la superficie. | Baja (2,7g/cm ³) | Muy variable (de muy antiguas a muy jóvenes) |
| OCEÁNICA (zonas sumergidas a partir del talud continental) | Reducido (5 a 12 km.) | Rocas ígneas: basalto y gabro . <i>Silicatos de Fe y Mg</i> | En tres capas: 1. Sedimentos 2. Basaltos 3. Gabros | Más elevada (3 g/ cm ³) | Jóvenes (hasta 180 millones de años) |

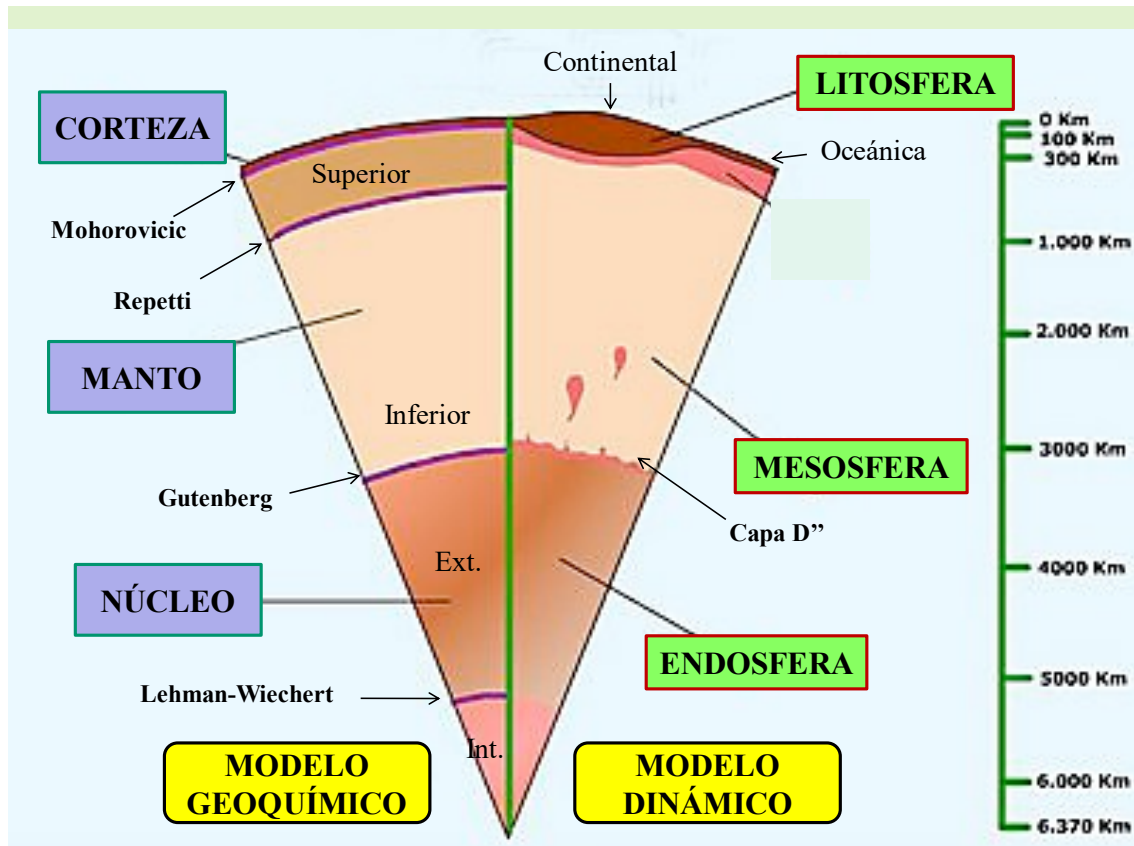
2. El **manto** es una capa intermedia y rocosa, separada del núcleo por la discontinuidad de **Gutenberg**, a 2.900 km de profundidad. Está formada sobre todo por **peridotitas**, unas rocas formada por silicatos básicos con un alto contenido en Fe y Mg (olivino y piroxenos). Su densidad es mayor que la de la corteza y varía entre 3,4 y 5,6 g/ cm³, aumentando conforme se incrementa la profundidad a causa de la presión creciente, lo que se ve confirmado por un aumento en la velocidad de las ondas sísmicas). Se divide por la discontinuidad de **Repetti** (a 670 km de profundidad) en **manto superior** y **manto inferior**.
3. La capa interna de la geosfera es el núcleo, que abarca desde la discontinuidad de Gutenberg a 2.900 km de profundidad hasta el centro de la Tierra a 6.371 km. Se divide en un **núcleo externo** líquido y un **núcleo interno** sólido, separados ambos a 5.150 km de profundidad por la discontinuidad de **Lehman – Wiechert**. La composición es metálica y varía desde una aleación de **hierro** (80 %) con Ni, O, S, y Si en el núcleo externo a hierro casi puro en el interno. La densidad varía de 9 a 13 g/ cm³.

5.2- EL MODELO DINÁMICO

Está basado en las propiedades físicas de los materiales, por lo que se distinguen las siguientes capas:

1. La **litosfera** es la capa más externa. Sus materiales están en estado sólido y son de carácter rígido, lo que hace que se fragmente en **placas litosféricas**. Incluye la corteza y la parte rígida del manto superior. Su espesor varía de 20 km en zonas oceánicas

jóvenes a 150 km en las cordilleras montañosas. En virtud del tipo de corteza que incluya se distingue la **litosfera continental** de la litosfera **oceánica**.



- La **mesosfera** corresponde al resto del manto y es una capa sólida, aunque fluida y viscosa. Este comportamiento plástico hace que existan procesos de convección muy lenta, en que los materiales semifundidos (cerca del punto de fusión) que se generan en la parte más inferior (la **capa D''**, en contacto con el núcleo externo) ascienden hacia la litosfera, dando origen al movimiento de las placas litosféricas y a los procesos geológicos internos.

El término *astenosfera*, capa del manto superior de materiales con cierto grado de fluidez que hace que disminuya la velocidad de las ondas sísmicas, en donde se atribuía anteriormente la formación de corrientes de convección que generan el movimiento de las placas litosféricas, está actualmente en desuso.

- Por último, la **endosfera** equivale al núcleo, con una subcapa interna sólida y una subcapa externa líquida con corrientes de convección independientes entre sí, responsables del campo magnético terrestre y del calentamiento de los materiales de la capa más interna del manto (capa D'').

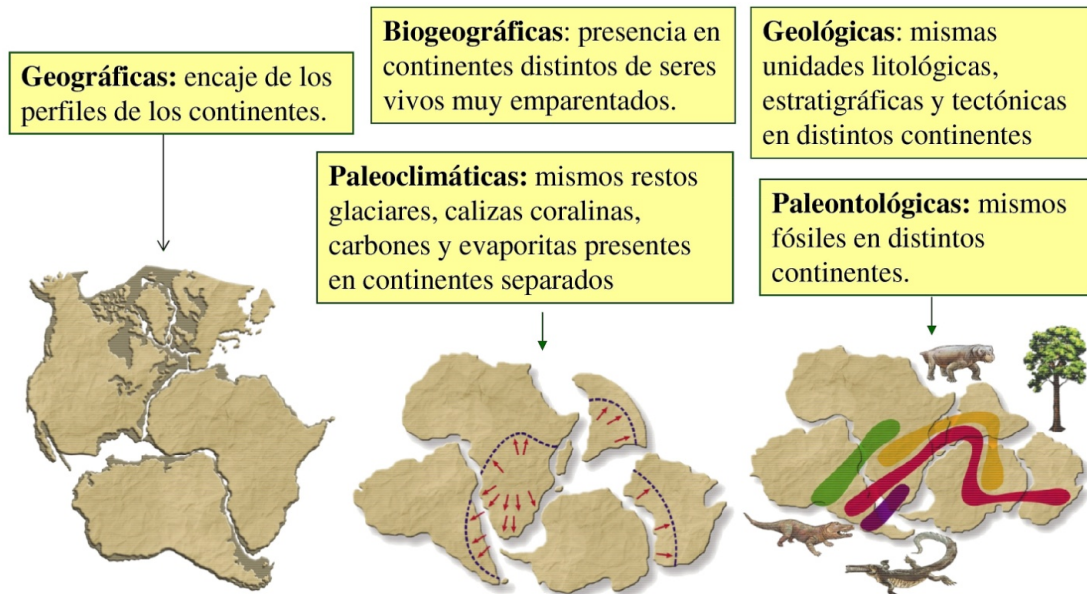
6- FIJISMO Y MOVILISMO

Desde los inicios de la investigación geológica, el origen de las montañas (u orógenos) es una de las preguntas más importantes que han planteado. Para responder a ella se han enunciado numerosas teorías orogénicas, recurriendo a distintos tipos de fuerzas que elevan y deforman los materiales.

Las teorías **fixistas o verticalistas** postulan que las fuerzas que actúan sobre los continentes son de tipo vertical, por lo que éstos y también los océanos no han sufrido importantes variaciones a lo largo de la historia geológica. Son las más intuitivas y por ello se enunciaron primero.

En cambio, las teorías **movilistas u horizontalistas** sostienen que los orógenos (se producen gracias a fuerzas laterales. Por tanto, los continentes se desplazan gracias a estas fuerzas tangenciales.

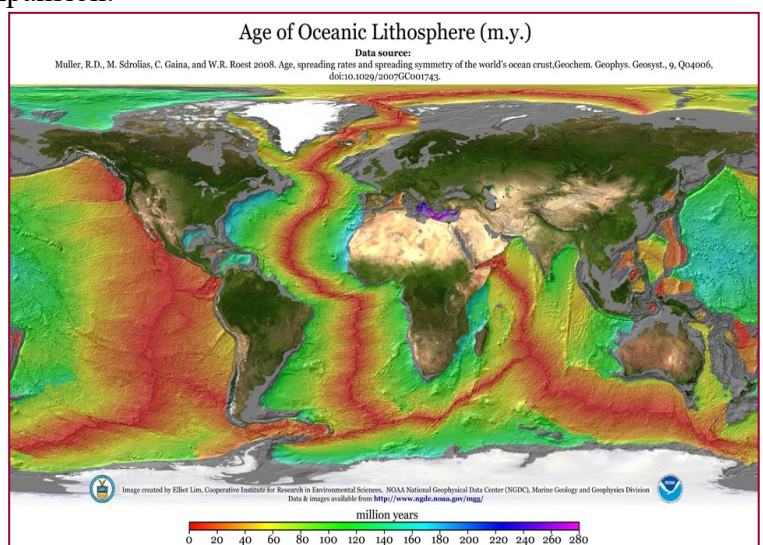
La primera de estas teorías fue la **deriva continental** enunciada por Alfred Wegener a principios del siglo XX. En ella, postulaba el desplazamiento horizontal de los continentes al flotar sobre materiales más densos, de tal modo que la disposición actual de los continentes es la resultante de la fragmentación de un supercontinente existente hace 250 millones de años (Pangea). Este desplazamiento genera colisiones continentales y el plegamiento de los sedimentos, algo que origina las montañas. Aunque aportó pruebas muy sólidas, no fue convincente en su época el origen del movimiento de los continentes.



Arthur Holmes determinó en el año 1929 que la astenosfera (la *capa débil* definida por Joseph Barrell en 1914) presentaba corrientes de convección, lo que podría explicar el movimiento de los continentes y dar un espaldarazo a la teoría de la deriva continental.

Una vez cartografiados los fondos marinos a mediados del siglo XX, los relieves detectados (dorsales oceánicas centrales y fosas oceánicas periféricas separadas por extensas llanuras abisales) no encajaban en las teorías fijistas. De estos descubrimientos surgió la idea de que el fondo de los océanos estaba en expansión:

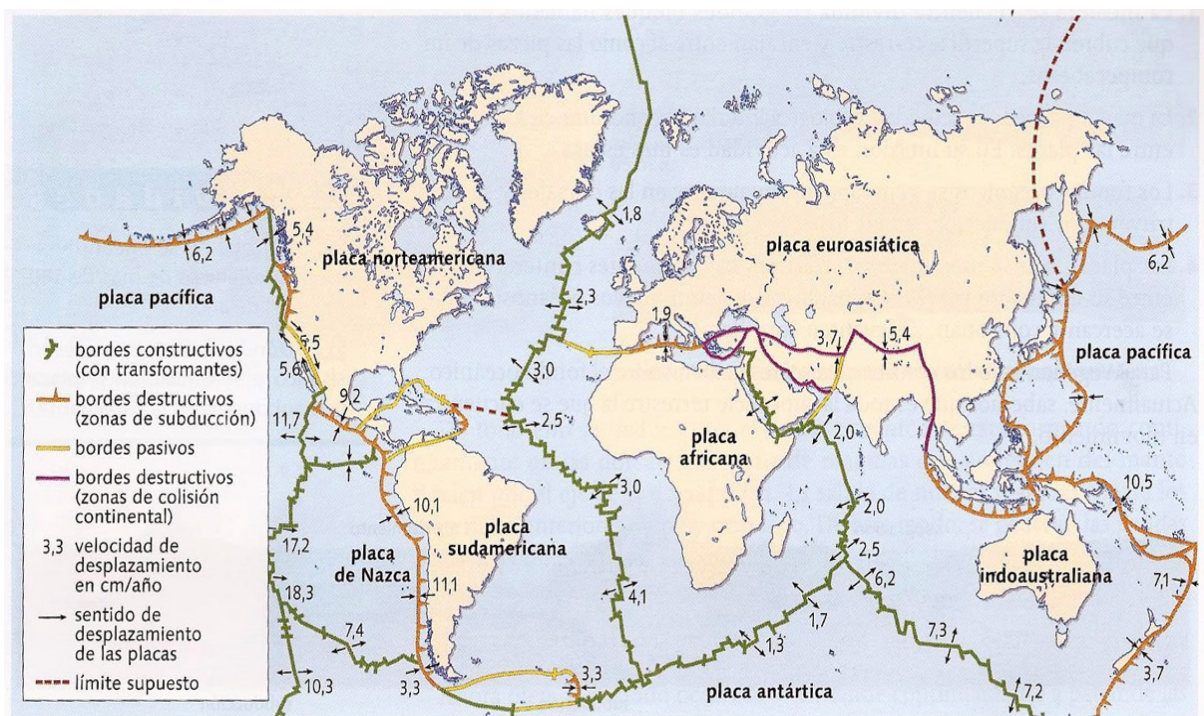
- En las dorsales oceánicas afloran materiales fundidos, lo que se genera corteza oceánica de forma simétrica a ambos lados del eje de la dorsal. Consecuentemente, la edad de las rocas aumenta conforme nos alejamos de este eje.
- La corteza oceánica se destruye en las fosas oceánicas, por lo que la edad de sus rocas no supera los 250 millones de años.
- Los continentes son arrastrados por la corteza oceánica, separándose en las zonas de expansión.



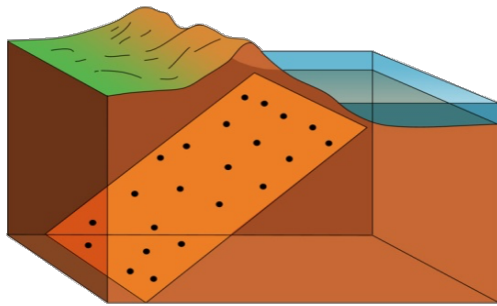
7- LA TECTÓNICA DE PLACAS

La teoría de la **tectónica de placas** es el actual paradigma de la geología y surgió a finales de los años 60 del siglo pasado a través del aporte de numerosos equipos científicos. Se resume en los siguientes puntos:

1. La Litosfera se encuentra dividida en fragmentos rígidos denominados **placas litosféricas**.
2. Las placas litosféricas flotan y se desplazan (entre 1 y 12 cm/año) sobre el **manto** fluido, que tiene un comportamiento plástico.
3. Existen dos tipos de placas:
 - **Oceánicas**: formadas sólo por corteza oceánica. *Pacífica, Nazca, Caribe, Cocos, Filipina.*
 - **Mixtas**: formadas por corteza oceánica y continental. Incluyen a los continentes, por lo que éstos se desplazan con las placas. *Euroasiática, Africana, Indoaustraliana, Árabe, Norteamericana, Suramericana y Antártica.*
4. Los límites de placas constituyen las zonas de mayor actividad geológica. Pueden ser de tres tipos:
 - **Divergentes** o constructivos. Se genera litosfera oceánica a causa de inyecciones sucesivas de materiales basálticos, lo que produce la separación de las placas.
 - **Convergentes** o destructivos. Se produce un choque de placas. En el caso de que una sea oceánica, ésta subduce debajo de la otra. En las zonas de subducción, la corteza oceánica se funde y se incorpora al manto.
 - **Pasivos** o transformantes. Corresponden a zonas de deslizamiento tangencial de placas. Son límites donde no se crea ni se destruye litosfera oceánica.
5. La litosfera oceánica se genera en las dorsales oceánicas y se destruye en las zonas de subducción.



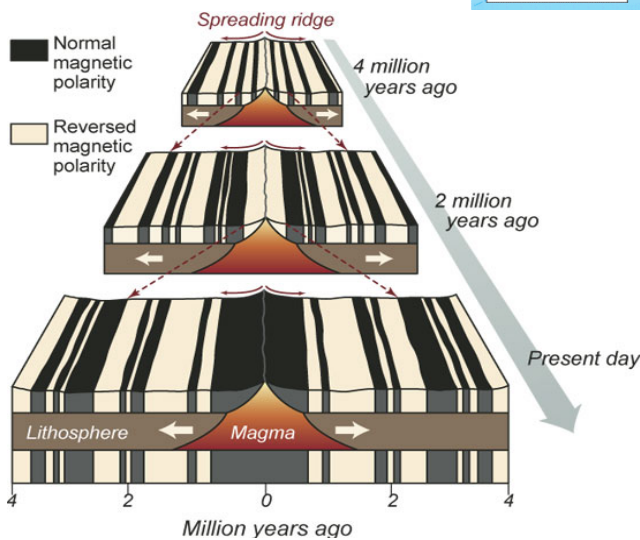
Pruebas de la tectónica de placas:



Plano de Benioff:

Disposición en un plano inclinado de los focos de los terremotos. Se corresponde con la superficie de subducción de la placa oceánica bajo la continental.

Distribución de volcanes, terremotos y orógenos recientes, que coinciden con los límites de placas.



Bandeado magnético de las dorsales (a través del paleomagnetismo registrado al formarse en las rocas volcánicas con magnetita):
Las inversiones periódicas del campo magnético terrestre se visualizan a ambos lados del eje de la dorsal.

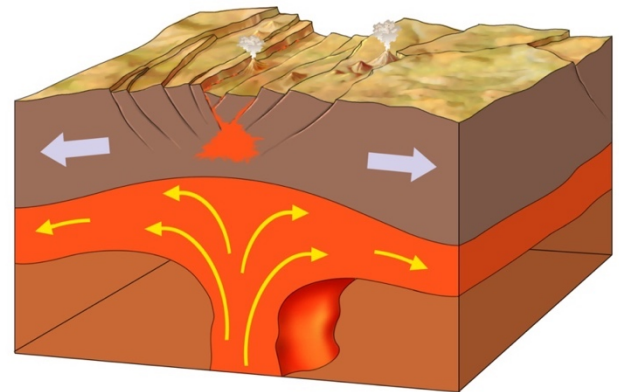
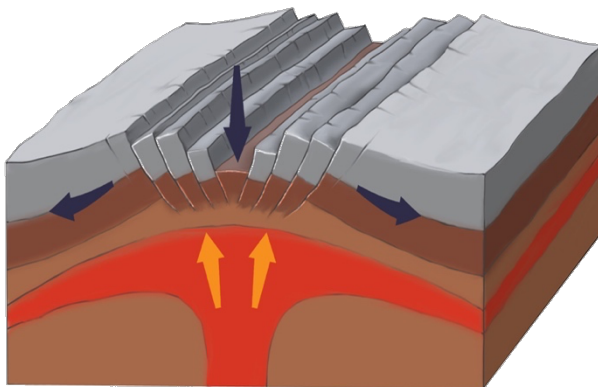
Medición del movimiento de las placas litosféricas:

- Europa-América: 6 mm/año
- Desplazamiento aparente del Punto caliente de Hawaii

7.1 LOS LÍMITES DIVERGENTES

Son los lugares donde se genera litosfera oceánica a causa de inyecciones sucesivas de materiales basálticos (de allí que se denominen *constructivos*), lo que produce la separación de las placas (por eso se consideran *divergentes*). Corresponden a las siguientes estructuras:

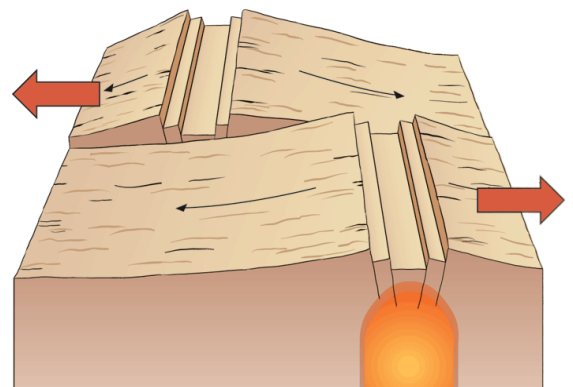
1. Las **dorsales oceánicas**. Son cordilleras submarinas de una altura de unos 3 km y una anchura que oscila entre 1.000 y 4.000 km. Recorren todos los océanos formando una estructura que supera los 64.000 km. Constan de una profunda depresión central (**rift**) formada por distensión y que constituye el límite entre las placas. Es a través de esta grieta por donde salen los magmas formados por la disminución de la presión, que consolidan rápidamente en rocas volcánicas de tipo basáltico, las cuales se sitúan a ambos lados del rift. El empuje de las nuevas masas rocosas produce la separación de las placas y es el responsable de la aparición de terremotos de magnitud moderada y focos poco profundos (hasta 7 km). En ocasiones las rocas volcánicas generadas se acumulan tanto que emergen formando islas (*Islandia, Azores*).
2. Los **rifts continentales** aparecen en tierras emergidas (*región de los grandes lagos en el este de África*) y corresponden a zonas en donde los continentes se fracturan por distensión. Esto genera un sistema de fallas que delimita una depresión denominada valle de rift. El adelgazamiento de la corteza continental facilita el ascenso del magma, por lo que aparecen fenómenos volcánicos.



7.2 LOS LÍMITES PASIVOS

Se denominan así porque son límites donde no se crea ni se destruye litosfera oceánica. Corresponden a zonas en que las placas se desplazan lateralmente en movimientos relativos con la misma dirección, pero en sentidos opuestos. Esta fricción es la que genera frecuentes e intensos terremotos de foco somero.

1. En zonas oceánicas corresponden a las **fallas transformantes**, que separan segmentos de dorsales oceánicas y que se originan por tensiones derivadas de la separación de placas esféricas.
2. También se encuentran este tipo de fallas en tierra emergidas (*falla de San Andrés, en California*).

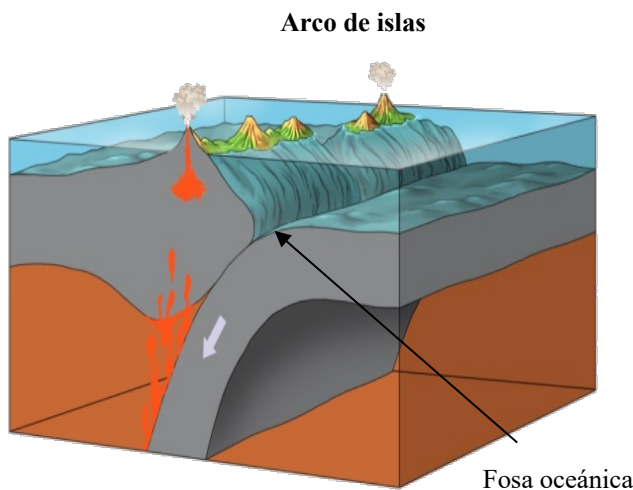


7.3 LOS LÍMITES CONVERGENTES

Conforme la litosfera oceánica se aleja de la dorsal donde se generó, se enfría y se hace más densa, por lo que se va hundiendo progresivamente hasta que se aproxima a otra placa (por

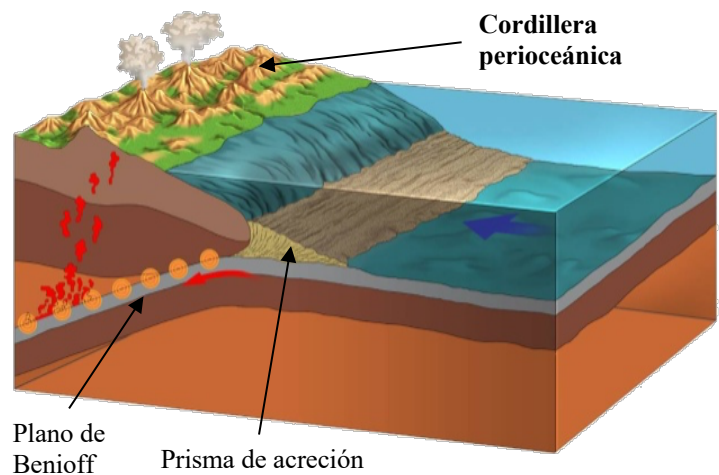
ello son límites *convergentes*). En el momento en que chocan, la litosfera oceánica (**placa subducente**) se dobla y se introduce bajo la otra, menos densa (**placa cabalgante**), en un proceso denominado **subducción**. Se consideran límites destructivos porque en las zonas de subducción la corteza oceánica se funde y se incorpora al manto.

En las zonas de subducción, la placa subducente siempre es oceánica, mientras que la cabalgante puede ser tanto oceánica como continental. En estos límites se produce sismicidad (por el empuje de la subducción), vulcanismo (a partir de los magmas originados por la fusión de la placa subducente debido al rozamiento de las placas al subducir), metamorfismo (por el incremento de la presión y la temperatura) y los siguientes relieves en función de la placa cabalgante:



- Si es oceánica, se produce la subducción de la placa oceánica de materiales más antiguos (más fríos y densos, por tanto). Se originan alineaciones de islas volcánicas conocidas como **arcos de islas** (por ejemplo, las Filipinas y las Antillas), asociadas a profundas **fosas oceánicas**. La placa cabalgante se engrosa por el choque y los magmas generados forman sobre él volcanes que afloran como islas.
- Si es continental, se forman **orógenos térmicos** o cordilleras periocénicas (como los Andes o los Alpes neozelandeses).

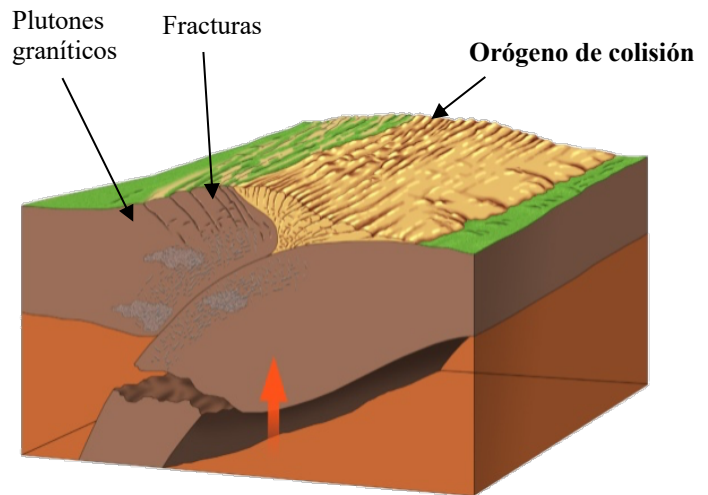
Estas cordilleras se forman por el engrosamiento de la placa cabalgante producido por la consolidación de los magmas en el interior (plutones) o en el exterior (volcanes) y por el plegamiento y elevación de los materiales del **prisma de acreción** (sedimentos que se acumulan en la fosa oceánica situada en la zona de subducción). Por otra parte, el deslizamiento de las placas es la causa de la alta sismicidad de estas regiones (cuyos focos se alinean en el plano de Benioff).



En el caso del choque entre dos placas continentales, no existe subducción. Se produce entonces el cabalgamiento de una placa sobre la otra, a causa de la escasa diferencia de densidad entre ambas. Las placas que chocan estaban separadas anteriormente por una cuenca oceánica que se ha ido cerrando progresivamente debido a la subducción de la litosfera oceánica. Al producirse la colisión (llamada **obducción**) de las placas continentales, el movimiento se detiene y ambas se unen (suturan), por lo que crece la corteza continental.

En los bordes de colisión se generan los **orógenos de colisión** o cordilleras intercontinentales (como el Himalaya o los Pirineos). Tienen un origen tectónico debido a que materiales de las placas (junto con los sedimentos situados entre ellas y que corresponden al océano que se ha cerrado) se pliegan, fracturan y apilan por el choque en torno a la zona de sutura.

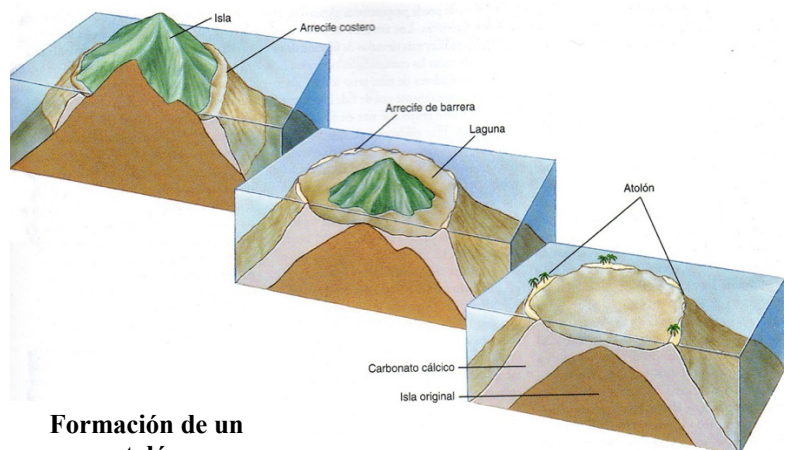
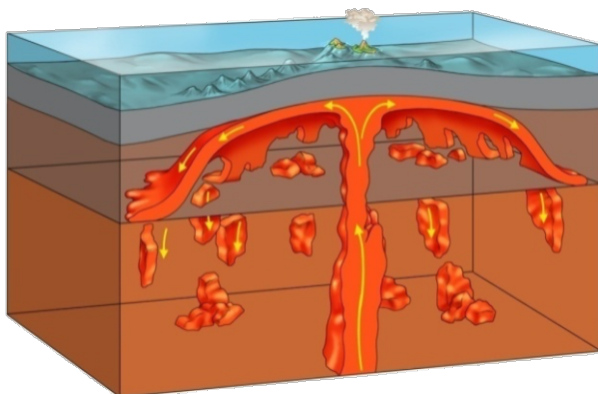
La compresión de las dos placas al colisionar genera **sismicidad** asociada a las fracturas que se producen. También existe magmatismo, puesto que el rozamiento entre placas funde los materiales. Generalmente suele ser plutonismo, dado que el vulcanismo es muy escaso porque el elevado grosor de las placas suele impedir el ascenso de magma. El metamorfismo se produce en las zonas profundas por las altas presiones y temperaturas que se alcanzan.



7.4- LOS FENÓMENOS INTRAPLACA

Existen zonas del interior de las placas litosféricas, denominados **puntos calientes**, bajo las cuales ascienden penachos térmicos del manto. Estos materiales a alta temperatura pueden fundir los materiales de la placa, por lo que se generan magmas. Dependiendo de la placa, pueden generar los fenómenos siguientes:

- Si el punto caliente se encuentra debajo de una placa continental, como es de gran espesor, el calor se acumula debajo de él, por lo que abomba a causa de la disminución de densidad que las rocas experimentan al dilatarse. Esto genera **mesetas elevadas** que pueden fracturarse por distensión (*rifting*) y originar un **rift continental** al seguir el abombamiento y generar vulcanismo intracontinental por la salida el magma al exterior (*Yellowstone*).
- Las placas oceánicas son más delgadas, por lo que, si hay un punto caliente debajo de ellas, se abomban y rápidamente se fracturan. Los magmas que se emiten por estas fracturas dan origen a **islas volcánicas** que pueden alinearse formando archipiélagos (*Islas de Hawai, Azores o Reunión*). Al moverse la placa sobre la que están ubicadas, se produce un movimiento relativo del punto caliente (en realidad está fijo), por los que los volcanes se inactivan, se erosionan y se hunden por el peso formando montañas submarinas de cumbre plana que se denominan **guyots**. En el caso de que se formen arrecifes de coral de forma simultánea al hundimiento del volcán inactivo, se generan arrecifes forma anular llamados **atolones**.



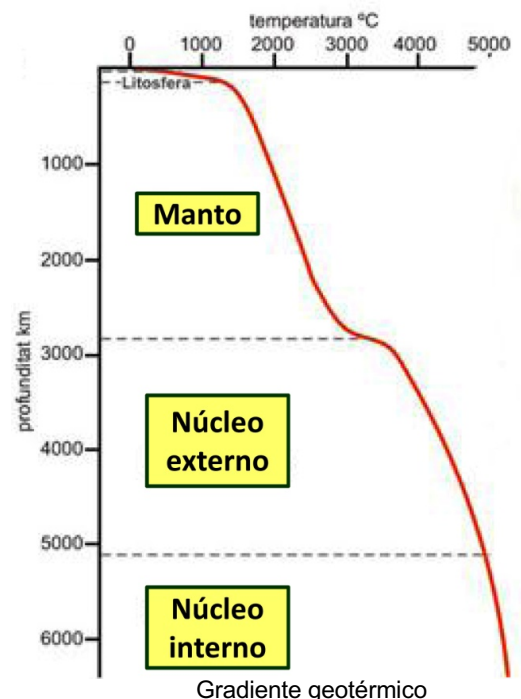
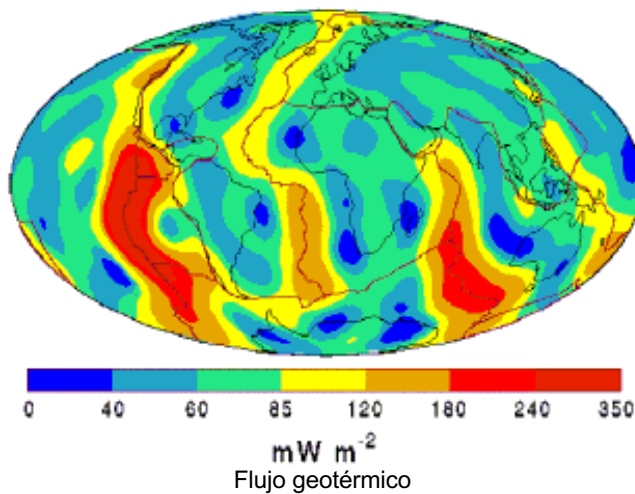
Formación de un atolón

8- LA DINÁMICA DE LAS CAPAS INTERNAS TERRESTRES

La energía interna de la Tierra es de tipo térmico y procede del calor generado en tres procesos ocurridos principalmente durante su origen como los siguientes

- El **impacto de meteoritos** durante la fase de acreción terrestre, en que la energía cinética de éstos se transforma en energía térmica, lo que funde los materiales.
- La **diferenciación gravitatoria** de los materiales fundidos, que hace que los materiales más densos (metálicos) descendan hacia las capas más internas y los más ligeros (incluyendo los gaseosos) asciendan a la superficie. El rozamiento entre las partículas que descenden con las rocas circundantes genera calor.
- La **desintegración de elementos radiactivos** (U^{235} , U^{238} , Th^{232} , K^{40}) presentes especialmente en la corteza, transformándose la energía nuclear en energía térmica. Es el único proceso que actualmente genera calor, aunque en menor cuantía que antaño, debido al agotamiento de estos elementos radiactivos.

Desde su formación, la Tierra se ha ido enfriando gracias al lento desprendimiento de esta energía térmica. Debido a que las rocas del manto y especialmente de la corteza son malas conductoras del calor, nuestro planeta todavía posee una importante cantidad de energía térmica en sus capas profundas. Por tanto, esa liberación de energía se produce todavía, definiéndose el **flujo geotérmico** (Q) como el calor liberado por unidad de superficie y tiempo. Su valor medio es $1,5 \times 10^{-6}$ cal / cm²*seg y tiene una distribución muy irregular: máxima en dorsales y márgenes continentales activos y mínima en continentes estables.



El **gradiente geotérmico** es el ascenso de la temperatura de los materiales terrestres con la profundidad. El valor medio en la corteza es $3^\circ \text{C} / 100 \text{m}$, aunque va disminuyendo en capas más profundas.

El calor interno terrestre, al disiparse hacia la superficie, genera una dinámica de dentro hacia afuera en las distintas capas terrestres que desemboca en los **procesos geológicos internos** que se manifiestan en la corteza, es decir, los movimientos corticales y sus fenómenos asociados (magmatismo, orogenias, sismicidad, metamorfismo).

8.1- LA DINÁMICA DEL NÚCLEO

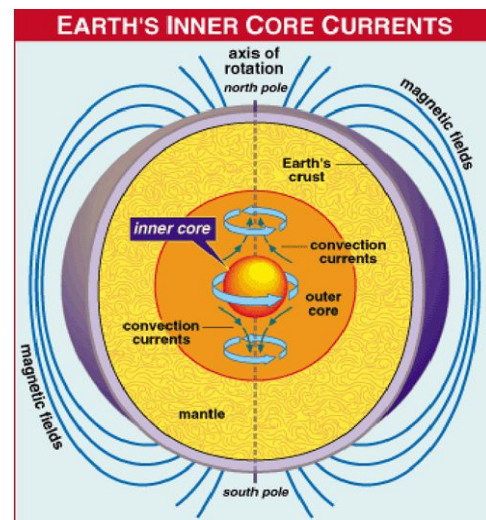
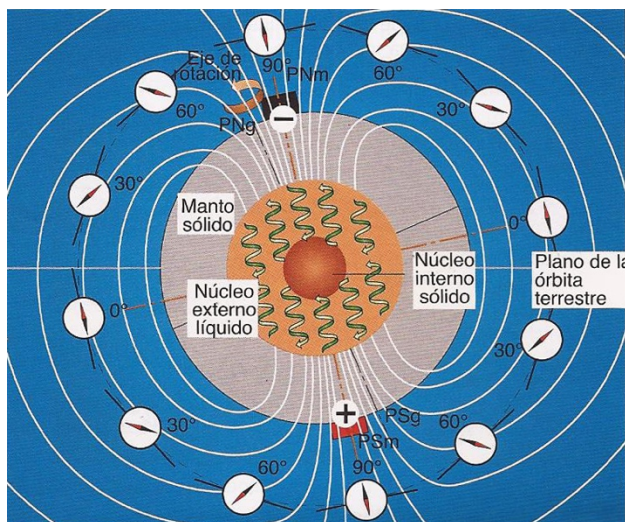
En el núcleo externo se forman corrientes de convección debido a la diferencia de temperaturas entre las dos caras de esta capa (4.000°C cerca de la discontinuidad de Lehman

y 3.000 ° C cerca de la de Gutenberg) y el estado líquido de los materiales. Estas corrientes movilizan las partículas de hierro, que se encuentran ionizadas.

Las partículas cargadas en movimiento originan corrientes eléctricas que, por inducción magnética, generan el **campo magnético** terrestre cuya influencia se extiende en una región en torno a la Tierra denominada **magnetosfera**, cuyas dimensiones varían de 60.000 a 300.000 km.

Una característica del campo magnético terrestre (revelada por el estudio del paleomagnetismo remanente presente en algunos minerales metálicos como la magnetita) son las **inversiones del campo**, de una periodicidad irregular, en que se intercambian las posiciones de los polos norte y sur.

La presencia de la magnetosfera en la Tierra evita la disociación y la pérdida del agua de la hidrosfera y también de los gases de la atmósfera. Por otra parte, repele partículas cargadas (de alta energía) del viento solar, muy nocivas para moléculas biológicas como el ADN por su fuerte carácter mutagénico. Por ambas razones, podemos afirmar que el campo magnético terrestre es uno de los factores de la existencia de vida en nuestro planeta.



Por otra parte, las corrientes de convección del núcleo externo calientan la capa más interna del manto (capa D''), originando así la dinámica del manto.

8.2- DINÁMICA DEL MANTO

La tomografía sísmica ha demostrado que la convección sublitosférica, que al principio se limitaba a una parte del manto (la astenosfera), se produce en todo el manto terrestre. Las corrientes ascendentes corresponden con las dorsales oceánicas, mientras que las descendentes coinciden con las zonas de subducción. A grandes rasgos, la circulación general que presentan los materiales del manto sería la siguiente:

1. De la capa D'' salen columnas de materiales a muy alta temperatura (y de baja densidad), constituyendo los **penachos térmicos** o **plumas convectivas**.
2. Estos penachos térmicos llegan (muy lentamente) hacia la litosfera en los límites divergentes o en los puntos calientes. El contacto de los materiales mantélicos a alta temperatura con los corticales puede producir la fusión de estos y originar magmas y el vulcanismo propio de estas zonas.

En ocasiones, el flujo de materiales calientes es tan grande (**periodos superpluma**) que generan grandes flujos de lava que, a su vez, originan las mesetas basálticas (*Timanfaya, península del Deccan*).

3. Los materiales del penacho térmico se enfrían en contacto con la litosfera, por lo que se hunden en el manto en corrientes descendentes de carácter difuso.
4. En las zonas de subducción, los materiales fríos (y densos) de la litosfera oceánica se incorporan al manto por gravedad, arrastrando al resto de la placa, hasta la discontinuidad de Repetti (a 670 km de profundidad). En ese lugar se acumulan materiales litosféricos hasta que se desploman muy lentamente (por el aumento de la densidad que supone la compresión de los materiales, lo que desencadena cambios mineralógicos) mediante **cascadas subductivas** hacia la capa D''. Allí, en contacto con los materiales a alta temperatura del núcleo externo, se vuelven a calentar.

Como consecuencia de la dinámica de las capas internas, el movimiento de las placas litosféricas es el resultante del **empuje** de materiales magmáticos que se produce en las dorsales, del **arrastre** efectuado por las corrientes descendentes difusas y el **tirón** que la subducción ejerce sobre la placa oceánica.

