

TEMA 3.3: LOS PROCESOS GEOLÓGICOS

1- INTRODUCCIÓN

2- LA OROGÉNESIS

3- LAS DEFORMACIONES CORTICALES

4- EL MAGMATISMO

5- EL METAMORFISMO

6- LA METEORIZACIÓN

7- LA ACCIÓN DE LOS AGENTES GEOLÓGICOS EXTERNOS

8- LA INTERACCIÓN DE LOS PROCESOS INTERNOS y EXTERNOS



Colada de lava bajo las cumbres del Teide y del Pico Viejo (Tenerife)

1- INTRODUCCIÓN

La dinámica de las distintas capas terrestres, impulsadas por la energía interna terrestre y por la energía externa procedente del sol, va a generar una serie de procesos geológicos que van a formar y destruir el relieve terrestre y los distintos tipos de rocas. Se dividen en dos grandes grupos:

1. Los **procesos geológicos internos**, que son los que se originan en el interior de la corteza terrestre, aunque se puedan manifestar en la superficie. Van a generar el relieve y dos tipos de rocas (ígneas y metamórficas). Estos procesos son los siguientes: **orogénesis** (y deformación cortical), **sismicidad**, **magmatismo** y **metamorfismo**. La energía empleada en estos fenómenos procede del **calor** interno de la Tierra (la denominada energía interna) responsable del origen de la dinámica cortical al disipar hacia la superficie.
2. Los **procesos geológicos externos** son los que se originan y manifiestan en la superficie terrestre por la interacción de la geosfera con las capas fluidas terrestres (atmósfera y hidrosfera). Las consecuencias de estas acciones son el modelado del relieve (a través de su destrucción) y el origen de las rocas sedimentarias. Estos procesos son los siguientes: **meteorización**, **erosión**, **transporte**, **sedimentación** y **diagénesis**. En este caso, la energía necesaria para el desarrollo de estos procesos procede del **sol** (la energía externa) que, junto con la gravedad, es la responsable del ciclo del agua y de la circulación atmosférica.

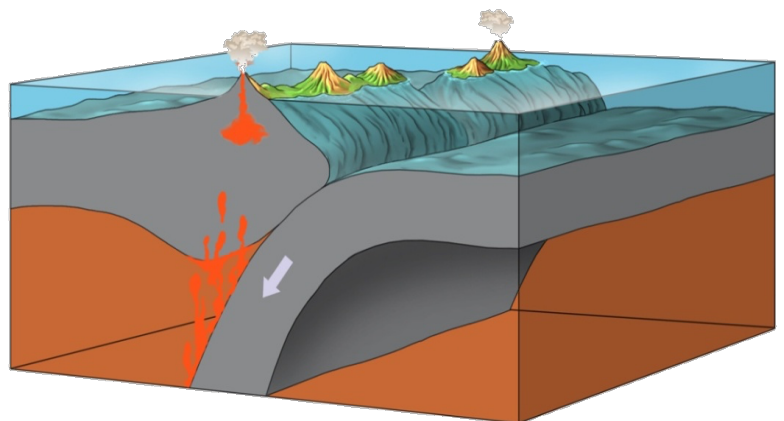
2- LA OROGÉNESIS

La **orogénesis** es el conjunto de procesos que forman los **orógenos**, estructuras geológicas que se corresponden con las cordilleras montañosas. Se produce en zonas geológicamente activas como los límites convergentes de placas, regiones sometidas a grandes esfuerzos tectónicos de compresión que deforman los materiales (con presencia de terremotos, pliegues y fallas), además de producir magmatismo y metamorfismo.

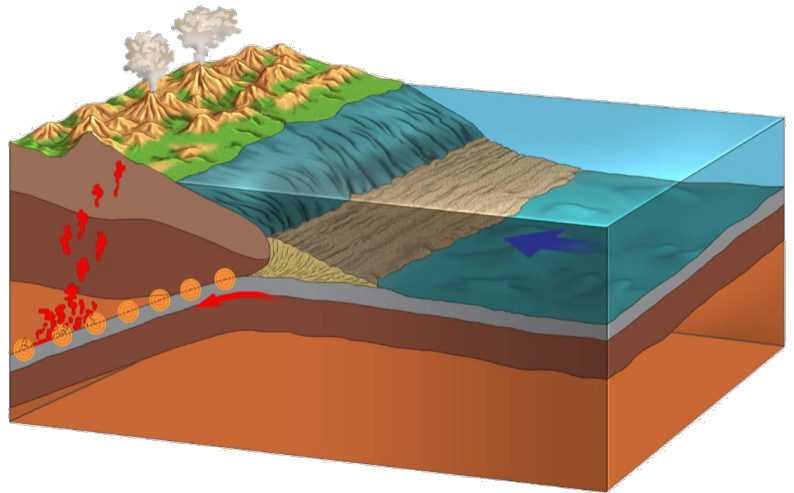
Una **orogenia** es una secuencia de eventos geológicos que ocurren en el periodo que lleva a la formación de un orógeno o cordillera montañosa. En Europa se han producido las orogenias caledoniana y herciniana en el paleozoico, y la alpina en el cenozoico.

Los **orógenos de subducción** son los que se producen en un límite convergente en la que se encuentra implicada una placa oceánica que subduce debajo de la otra. En función de la placa cabalgante se forman:

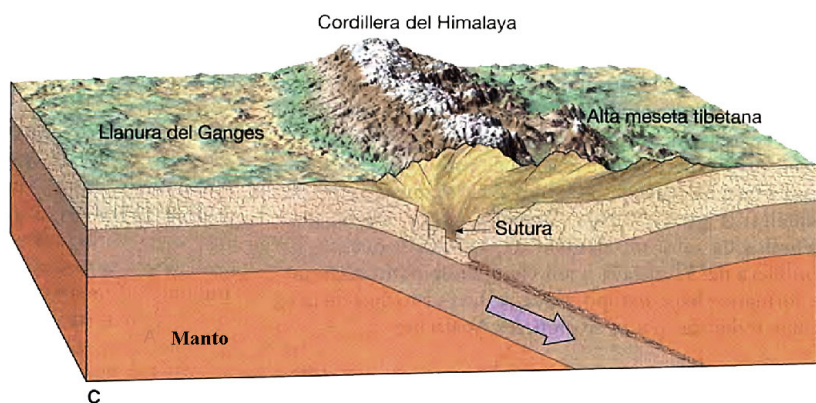
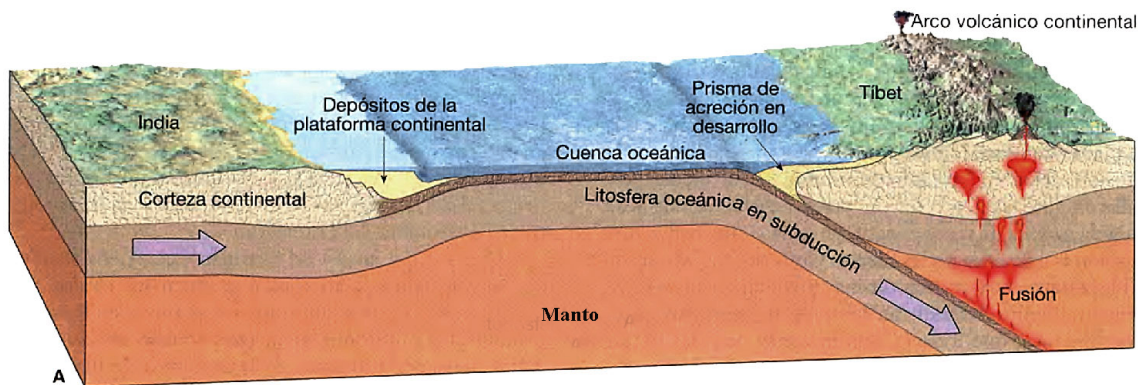
- Un **arco de islas** (*Japón, Antillas, Marianas*) si la placa cabalgante es oceánica. El plano de subducción tiene una gran pendiente, por lo que se forma una fosa muy profunda que no permite la acumulación de sedimentos. La intensa actividad volcánica que se produce es la que genera las islas, alineadas en su característica formación de arco.



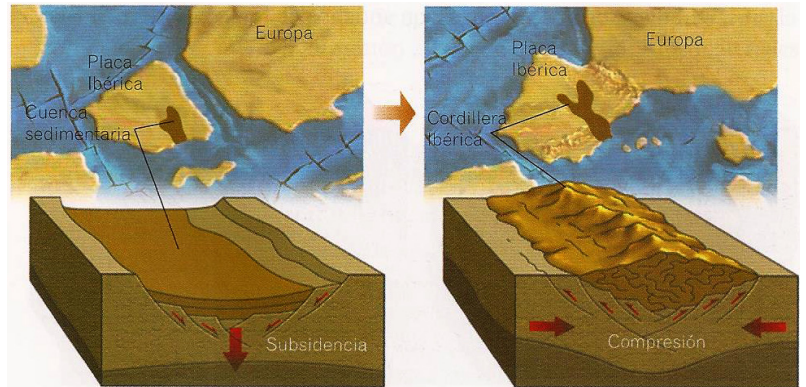
- Si la placa es continental, se forma un **orógeno térmico** o andino (*Andes, Sierra Madre*). Al presentar una subducción con una menor inclinación, la fosa es poco profunda y los sedimentos se acumulan en el prisma de acreción. Las rocas sedimentarias formadas allí se pliegan y fracturan, aflorando e incorporándose a la cordillera. Por otra parte, el calor originado por la fricción entre las placas, junto con la presencia de agua en la placa oceánica, favorece la generación de magmas que pueden formar plutones o volcanes, contribuyendo así al engrosamiento de la corteza continental y de la cordillera.



Los **orógenos de colisión** se producen en lugares de convergencia de placas litosféricas mixtas que finalizan en la colisión de dos continentes. En un inicio, se produce una subducción de la parte oceánica de la placa bajo un continente. Al progresar, la parte continental de la placa mixta avanza hasta cerrar el océano y chocar con el continente de la placa cabalgante. Los sedimentos del antiguo mar, junto con los materiales de ambos continentes, se pliegan formando una cordillera intercontinental que los une (*Pirineos, Alpes, Himalaya*).



Existen **orógenos intraplaca**, que se originan a partir de una depresión que se rellena de sedimentos. Cuando las placas cambian el sentido de su desplazamiento, estos sedimentos se comprimen por lo que se pliegan y se fracturan, formándose una cordillera (*Sistema ibérico, Atlas*).



Por último, los **orógenos de acreción** se forman a partir del choque sucesivo de litoferoclastos (microplacas) con una placa continental, produciendo el crecimiento de éste y la deformación de los materiales (*Montañas Rocosas*).

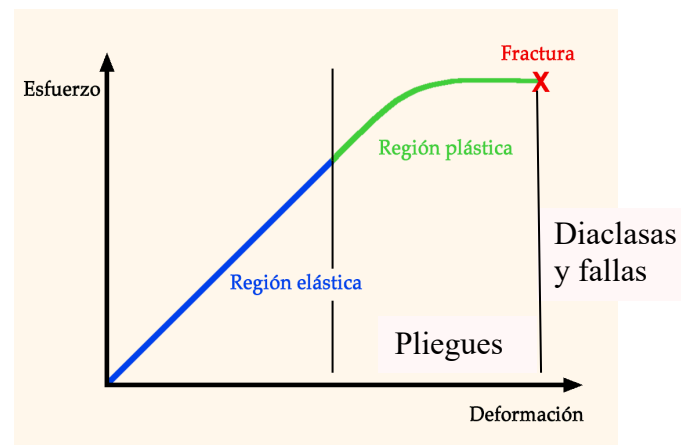
3- LAS DEFORMACIONES CORTICALES

La **tectónica** es la ciencia geológica que estudia las deformaciones que experimentan las rocas al ser sometidas a un esfuerzo. Éstos pueden ser:

- La **presión litostática** derivada del peso de los materiales situados por encima de una roca. Actúa por igual en todas las direcciones.
- Los **esfuerzos tectónicos** originados por la dinámica cortical. Son de dirección horizontal y pueden ser de compresión, de tracción o distensión, de cizalla y de torsión.

Ante los esfuerzos tectónicos, las rocas pueden sufrir **deformaciones** que, en función de sus características mecánicas, pueden ser de tres tipos:

1. **Elásticas** si la roca recupera la forma original cuando cesa el esfuerzo, siempre que no se supere su límite de elasticidad. A partir de ésta, la deformación pasa a ser plástica o incluso llegar a fracturarse. Cuando sucede esto último, la energía elástica acumulada en esta deformación se libera bruscamente, originando los seísmos o **terremotos**.
2. **Plásticas** (o dúctiles) en el caso de que las rocas no recuperen su forma original y mantengan la deformación al cesar el esfuerzo. Esta deformación se visualiza en los **pliegues**.



3. **Frágiles**, cuando el esfuerzo afecta a rocas rígidas o es del tal intensidad que supera el límite plástico de una roca. Esta deformación origina fracturas como **diaclasas y fallas**.

La **naturaleza de las rocas** es importante en el tipo de deformación que se produce, de tal modo que existen rocas de comportamiento más dúctil (rocas sedimentarias) que otras que son más rígidas (rocas ígneas). No obstante, una misma roca puede tener cualquiera de estas deformaciones en virtud de la intensidad del esfuerzo y de una serie de factores que influyen en las deformaciones y que favorecen la ductilidad como:

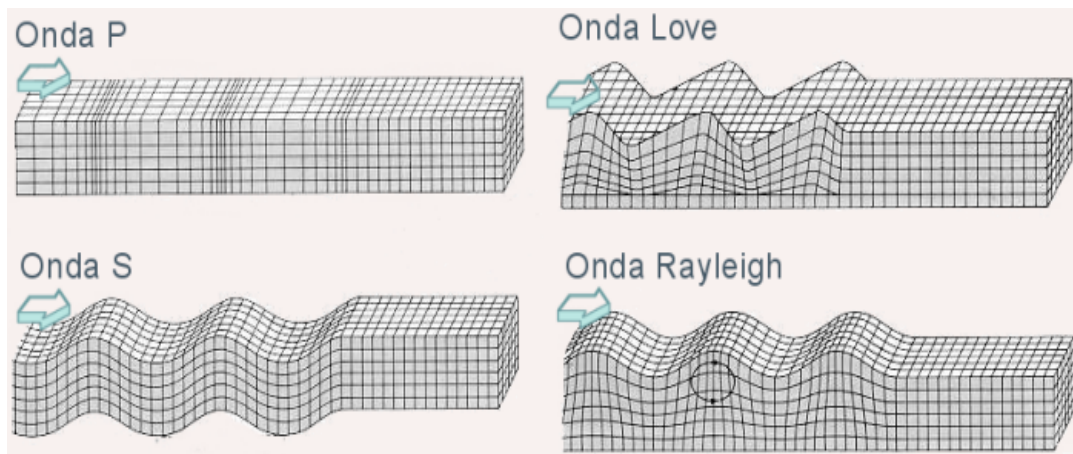
- La **presión litostática** (directamente proporcional a la profundidad).
- La **presencia de fluidos** como agua o petróleo en los poros de la roca.

- La **temperatura** (que se incrementa también con la profundidad).
- El **tiempo**, de tal modo que los esfuerzos bruscos favorecen deformaciones elásticas y frágiles, mientras que los continuados producen deformaciones plásticas.

3.1- LOS TERREMOTOS

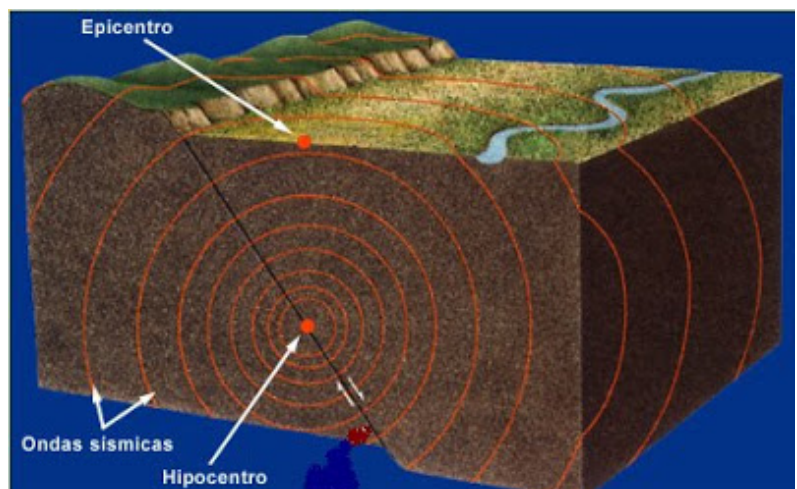
Procesos tectónicos como ajustes de placas o movimiento de bloques de falla, procesos volcánicos, en el caso de las erupciones, o incluso acciones humanas (voladuras con dinamita en minas o construcciones) pueden deformar elásticamente las rocas y acumular energía potencial elástica en ellas. Esta energía se puede liberar bruscamente al producirse la rotura de esta roca y propagarse en forma de ondas sísmicas que, al llegar a la superficie, originan los movimientos violentos de la superficie terrestre que conocemos como **seísmos** o **terremotos**. Estas **ondas sísmicas** pueden ser de dos tipos:

1. **Profundas:** arrancan desde el lugar donde se produce la liberación de energía (el hipocentro) y son de dos tipos: las **ondas primarias (P)**, en los que se produce la compresión de los materiales, y las **ondas secundarias (S)**, cuya deformación es perpendicular a la propagación.
2. **Superficiales:** se transmiten desde el epicentro en forma circular por la superficie, por lo son los que generan los temblores y, por tanto, los daños. Existen dos tipos: longitudinales love (L) de movimiento horizontal y Rayleigh (R), más lentos y de trayectoria elíptica.

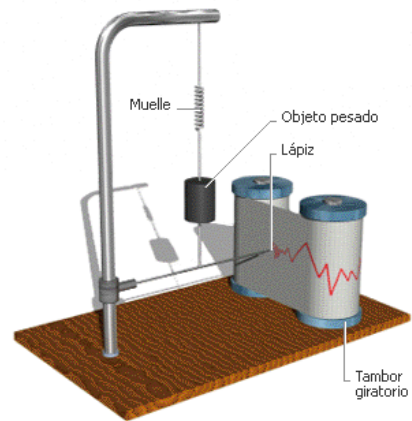


El foco de inicio de un terremoto es el **hipocentro** (punto que se puede localizar a distintas profundidades), del cual salen ondas P y S. Éstas llegan a la superficie terrestre en el **epicentro**, punto del que salen las ondas longitudinales L y R. Éstas se propagan por toda la superficie y provocan los daños.

Los movimientos sísmicos son registrados por los **sismógrafos**, aparatos basados en la inercia de un péndulo, que permanece in-



móvil durante la sacudida, y lleva un estilete que dibuja una gráfica denominada **sismograma**. Existen dos escalas que miden la fuerza de un terremoto:

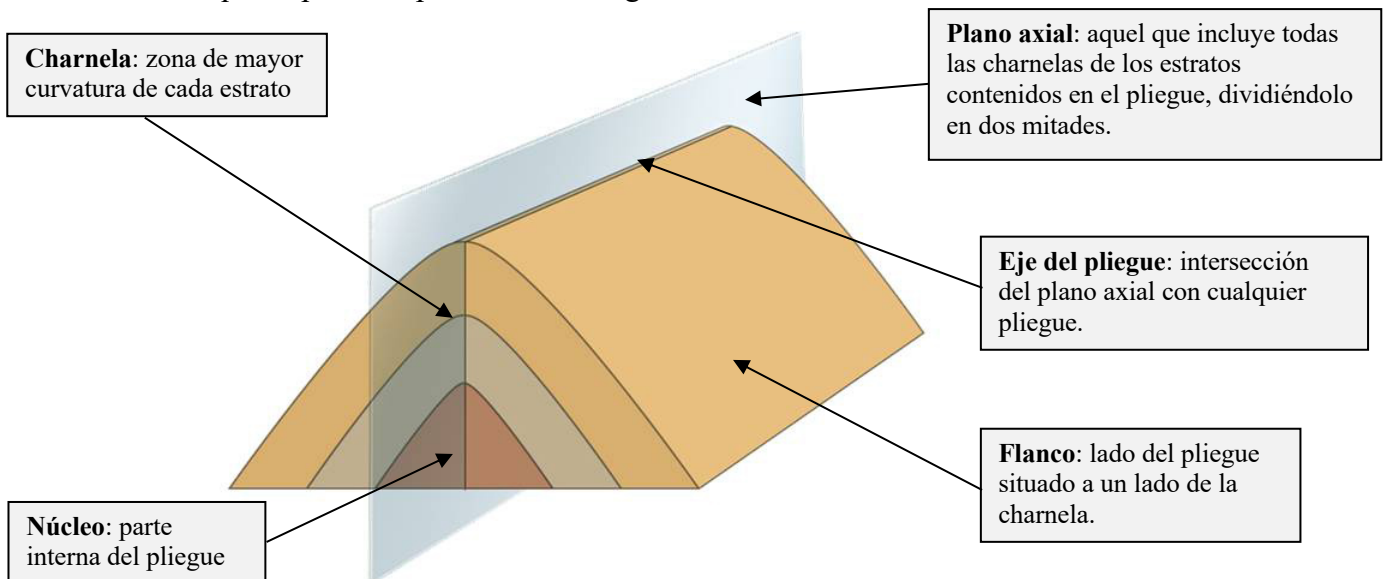


1. La **escala de Richter** mide la magnitud, es decir, la cantidad de energía liberada por el seísmo. La escala es logarítmica y varía de 0 a 9,5 que corresponde con los máximos registrados (*Chile 1960 y Alaska 1964*). Un punto más de magnitud supone una liberación de energía 31,6 veces mayor
2. La **Escala de Mercali** (en Europa se utiliza una muy parecida: la **M.S.K**) mide en cambio la **intensidad**, que es función de los daños observables en las construcciones y la naturaleza. Establece 12 grados (de I a XII) y se trata de una medida subjetiva.

Los **tsunamis** son series de olas procedentes del océano que son producidas como consecuencia de movimientos sísmicos (*Lisboa 1755, Indonesia 2004, Japón 2011*) o de manifestaciones volcánicas submarinas o explosivas (*Santorini 1627 A.C., Krakatoa 1883*). Estos muros de agua pueden superar los 30 metros de altura y producen la destrucción e inundación de zonas costeras hasta varios kilómetros tierra adentro.

3.2- LOS PLIEGUES

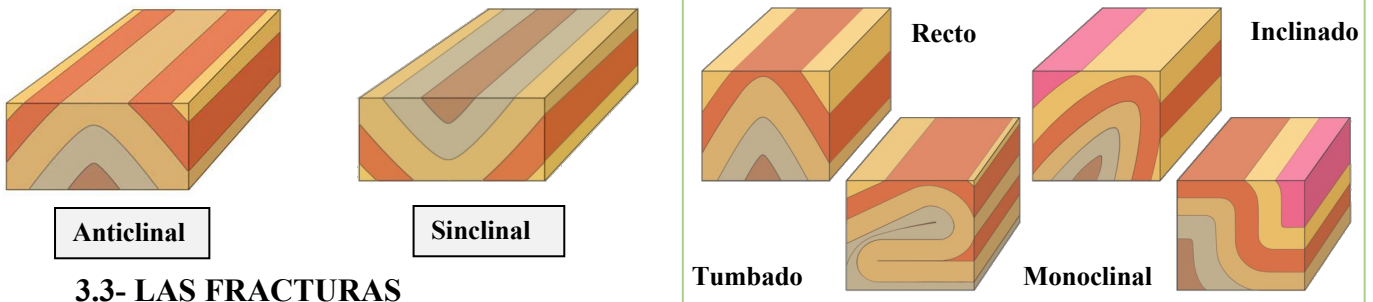
Los **pliegues** son estructuras resultantes de una deformación plástica ante un esfuerzo de compresión. Afectan principalmente a rocas sedimentarias y a algunas rocas metamórficas y se visualizan a través de la curvatura de los estratos de estas rocas. Un pliegue presenta los elementos que se pueden apreciar en esta figura:



La **dirección** de un pliegue es el ángulo que forma el eje del pliegue con el Norte geográfico. El **buzamiento** es el ángulo que forma que forma la superficie de un estrato con la horizontal.

Los pliegues se pueden diferenciar en distintas tipologías en virtud de varios criterios como la disposición de los estratos atendiendo a su antigüedad (pueden ser anticlinales si los

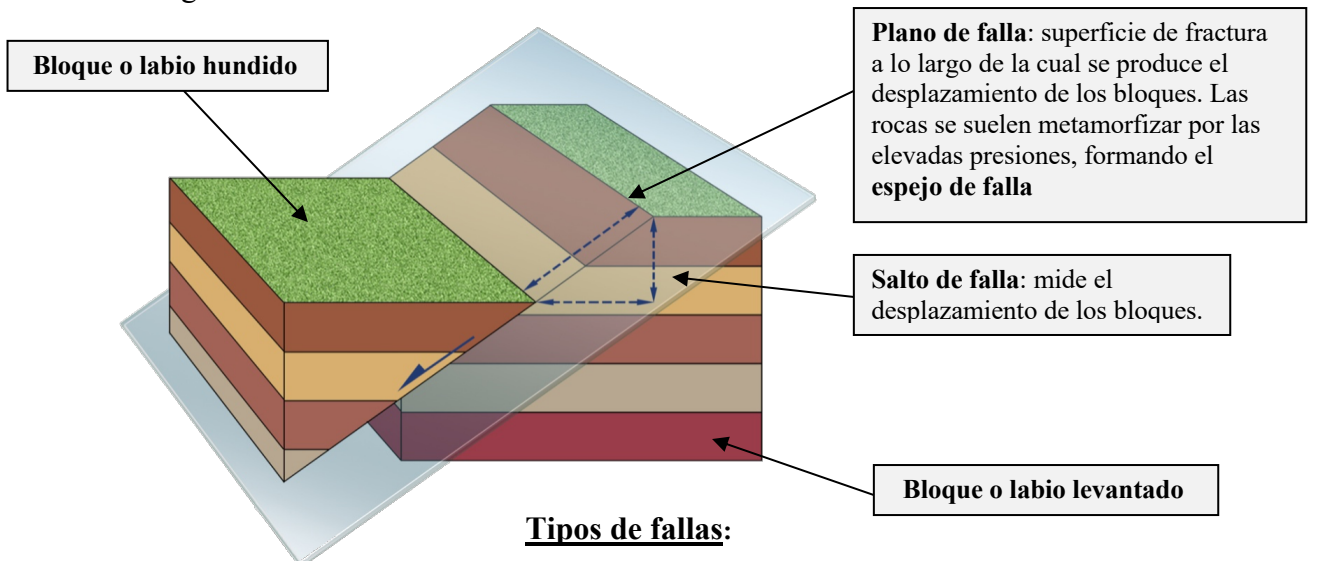
materiales más antiguos se encuentran en el núcleo o sinclinales, en el caso de que en el núcleo se dispongan los materiales más modernos), la posición de su plano axial (recto, inclinado, tumbado, acostado e invertido o recumbente) o su simetría (simétricos o asimétricos).



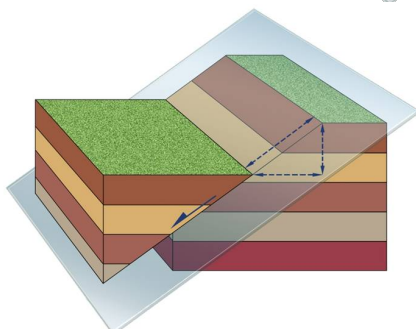
3.3- LAS FRACTURAS

En virtud del desplazamiento relativo de los fragmentos resultantes de la fractura, se distinguen dos tipos:

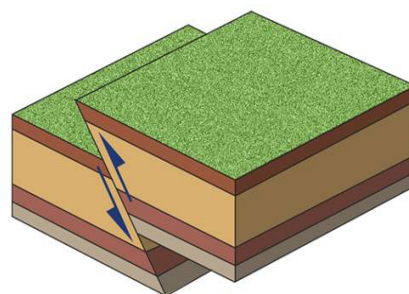
1. **Diaclasas:** grietas sin desplazamiento entre bloques. Se originan por **deseccación** (retracción de los materiales al secarse o consolidar, como la disyunción columnar en el basalto), **contracción** (en lados cóncavos de los pliegues) o **descompresión** (rocas plutónicas o metamórficas formadas en profundidad que afloran a la superficie).
2. **Fallas:** fracturas con desplazamiento entre bloques limitantes. Afectan a todo tipo de rocas y son resultados de fuerzas compresivas, distensivas o laterales. Sus elementos son los siguientes:



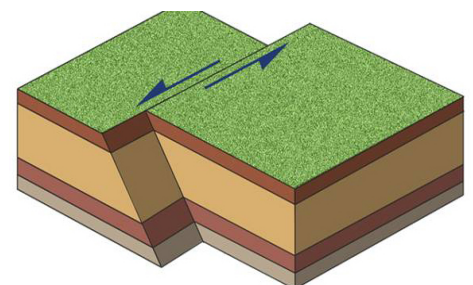
Tipos de fallas:



Directa o normal: plano de falla bajo el labio hundido. Consecuencia de fuerzas distensivas.



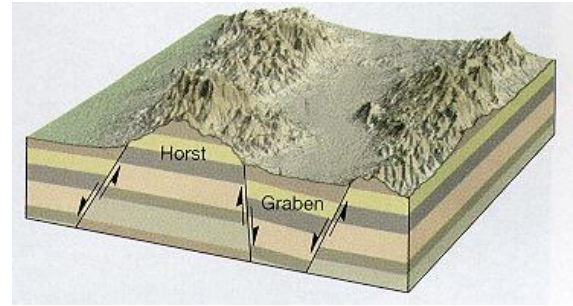
Inversa: plano de falla sobre el labio hundido. Se origina como respuesta a esfuerzos de compresión.



Horizontal o de **desgarre:** labios de falla que se desplazan horizontalmente.

Habitualmente, las fallas se encuentran asociadas formando estructuras como:

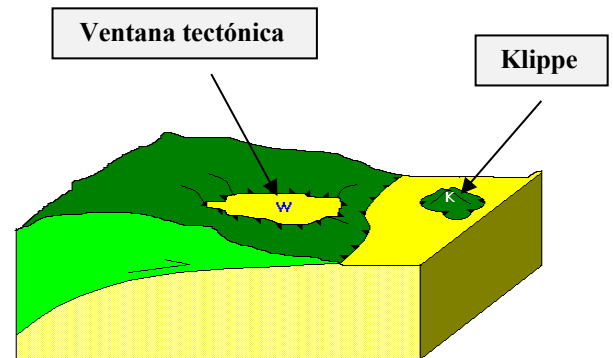
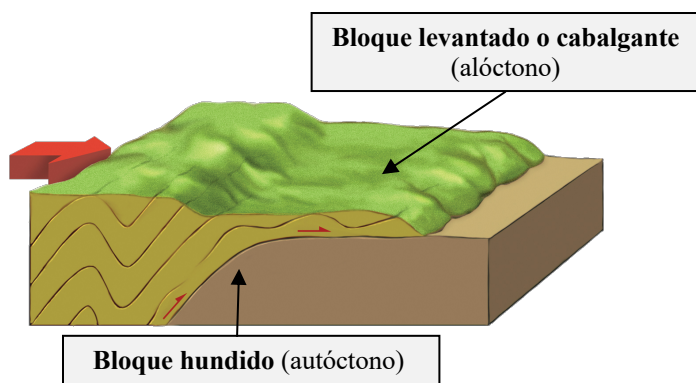
1. **Macizo tectónico o horst:** conjunto de fallas normales que presentan el labio central más elevado que los restantes.
2. **Fosas tectónicas o graben:** asociación de fallas normales con el labio central más hundido que los restantes.



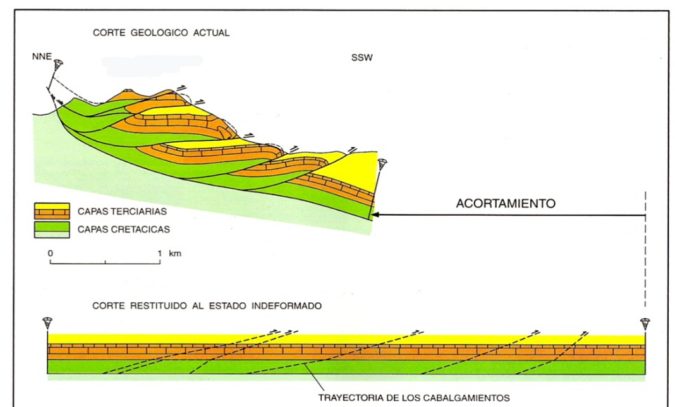
3.4 LOS CABALGAMIENTOS

En las cordilleras montañosas, las fallas y los pliegues se asocian en **pliegues-falla** debido a que las fuerzas compresivas que pliegan los materiales siguen actuando hasta su fracturación al llegar a su límite de plasticidad. Posteriormente, esas mismas fuerzas siguen actuando para formar dos tipos estructuras mixtas muy frecuentes en orógenos de colisión:

1. **Cabalgamientos.** Son fallas inversas de poco buzamiento. El bloque levantado (frecuentemente plegado) se desplaza sobre el hundido, lo que hace que materiales más antiguos se sitúen sobre más modernos.
2. Un **manto de corrimiento** es un cabalgamiento de grandes dimensiones, con un desplazamiento del bloque levantado que puede ser de centenares de kilómetros. Esto hace que se dispongan materiales alóctonos (más antiguos) sobre los autóctonos (más modernos). Además, pueden superponerse entre sí y generar nuevos plegamientos, lo que incrementa la altitud que alcanzan los macizos montañosos. La acción erosiva posterior puede generar **klippes** (restos de terrenos alóctonos) o **ventanas tectónicas** (afloramientos de terrenos autóctonos).



Cabalgamientos superpuestos dentro del manto de Gavarnie (macizo del Monte Perdido).



Acortamiento y apilamiento de cabalgamientos asociados a un manto de corrimiento (macizo de Bernera, Pirineos)

4- EL MAGMATISMO

El magmatismo es el conjunto de procesos geológicos en los que intervienen los magmas que, al consolidarse generan las rocas magmáticas. El **magma** es una mezcla compleja que consta de rocas fundidas a una temperatura de entre 700 y 1.200 °C, una fracción sólida formada por rocas sin fundir (xenolitos), fragmentos de rocas encajantes y minerales cristalizados, y una fracción volátil con vapor de agua, CO₂ y óxidos de S y N.

4.1- ORIGEN, EVOLUCIÓN Y CONSOLIDACIÓN DEL MAGMA

Los magmas se originan a partir de la fusión de materiales de la corteza y se acumulan en **cámaras magmáticas** situadas en su interior. A pesar de las altas temperaturas que se alcanzan, en el interior de la corteza los materiales están en estado sólido debido al efecto de la presión (algo que aumenta el punto de fusión). Por tanto, para que esta fusión se produzca y se origine el magma, tiene que producirse alguno de estos fenómenos:

1. **Pérdida de presión** ligada a la formación de fracturas cuando se produce distensión en una placa (punto caliente) o en un límite divergente (dorsal). Esta descompresión favorece además la salida de los magmas.
2. **Cambio en la composición de la roca** al incorporar volátiles (especialmente el vapor de agua) que rebajan el punto de fusión.
3. **Aumento de la temperatura de la zona** por el aporte de calor de una pluma convectiva del manto, o de la fricción de las placas en la subducción.

Al ser una mezcla compleja, la fusión de los magmas no se realiza de una vez, sino que abarca desde el punto de **solidus** (fusión del mineral con el punto de fusión más bajo) hasta el punto de **liquidus** (fusión del mineral con el punto de fusión más alto), intervalo en que la roca está en estado de fusión parcial.

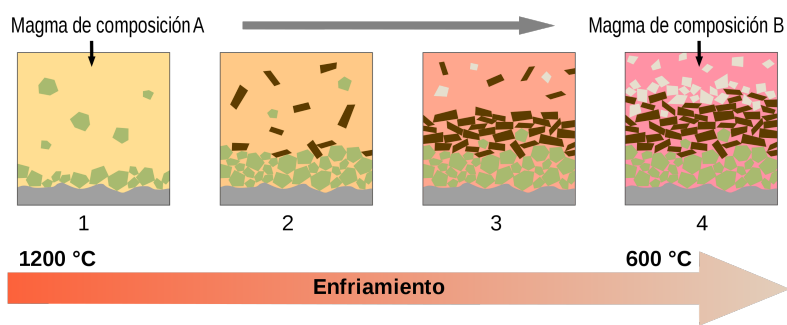
La fusión total o parcial (en sus diferentes grados) así como la litología de las rocas originales genera magmas diferentes. De este modo, en virtud de su acidez (contenido en sílice: SiO₂) se distinguen varios tipos de magma:



TIPO	Contenido sílice	VISCOSIDAD	TEMPERATURA	ROCAS y MINERALES
Ácido	Alto (>60 %)	Alta (fluyen poco)	Baja (< 800° C)	Granito y Riolita <i>Leucocratos (con Na y Ca)</i>
Intermedio	Medio (50-60 %)	Media	Media (hasta 1000 °C)	Andesita y Diorita.
Básico	Bajo (45- 50%)	Baja (fluyen mucho)	Alta (1000- 1200°C)	Basalto y Gabro. <i>Melanocratos (con Fe y Mg)</i>
Ultrabásico	Muy bajo (< 45%)	Muy baja	Muy alta (1200° C)	Peridotitas <i>Melanocratos (olivino y piroxenos)</i>

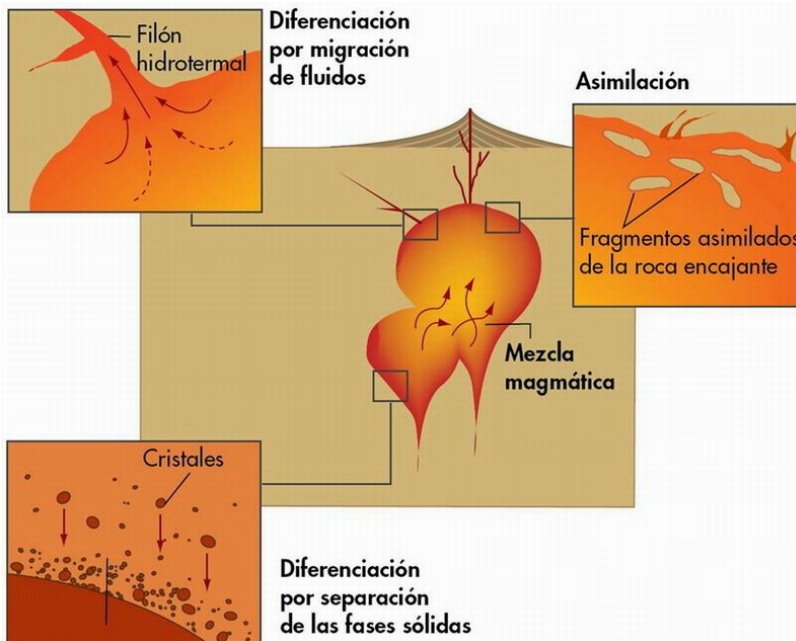
El magma puede sufrir a lo largo de su evolución modificaciones en su composición lo que origina la gran variedad de rocas ígneas que existen (aproximadamente 700). Esto se produce merced a tres procesos:

1. **La diferenciación magmática.** Los minerales que forman un magma no cristalizan a la vez, sino que lo hacen de forma progresiva en función de su punto de fusión (siendo éste inversamente proporcional a la complejidad de los silicatos: primero cristaliza el olivino y por último el cuarzo). Conforme se van formando los minerales durante la consolidación, se separan del magma y sedimentan en el fondo de la cámara magmática. Esto hace que la composición del magma secundario resultante difiera del primario original y vaya creciendo progresivamente su proporción de sílice, pues los minerales que consolidan primero son los que menos proporción tienen de esta sustancia. De este modo, un magma básico puede convertirse gradualmente en un magma ácido.



2. **La asimilación magmática:** el magma en su ascenso puede incorporar y fundir xenolitos procedentes de las rocas encajantes (las que rodean la cámara magmática), por lo que la composición resultante variará.

3. **La mezcla de magmas** de diferentes composiciones en la misma cámara magmática. De este modo se origina un nuevo magma de composición diferente a los originales.



El magma se comporta como un líquido viscoso, por lo que tiende a fluir hacia la superficie terrestre en forma de **plutones** (bolsas masivas) o **filones** (grietas). Cuando alcanza la superficie terrestre origina los fenómenos volcánicos.

En este ascenso, el magma se enfría progresivamente y se produce una cristalización fraccionada, dado que

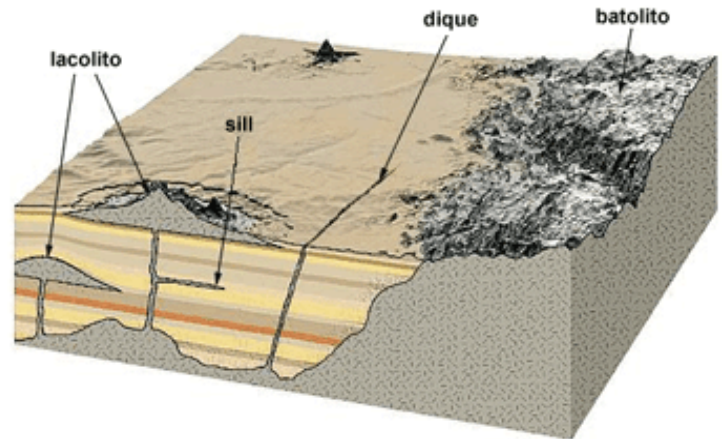
no todos los componentes solidifican a la misma temperatura, por lo que van apareciendo durante las sucesivas fases. También ocurre que los minerales solidificados pueden cambiar posteriormente unos en otros al reaccionar éstos con la fase fluida. La consolidación de un magma va a originar las **rocas ígneas o magmáticas**, cuya amplia diversidad se debe a los distintos magmas que se pueden obtener en función de su origen, y a las distintas posibilidades en la evolución de su consolidación.

- Minerales de bajo punto de fusión: cuarzo, feldespatos.
- Minerales de alto punto de fusión: olivino, piroxenos, anfíboles, biotita.

4.2 LAS ESTRUCTURAS PLUTÓNICAS

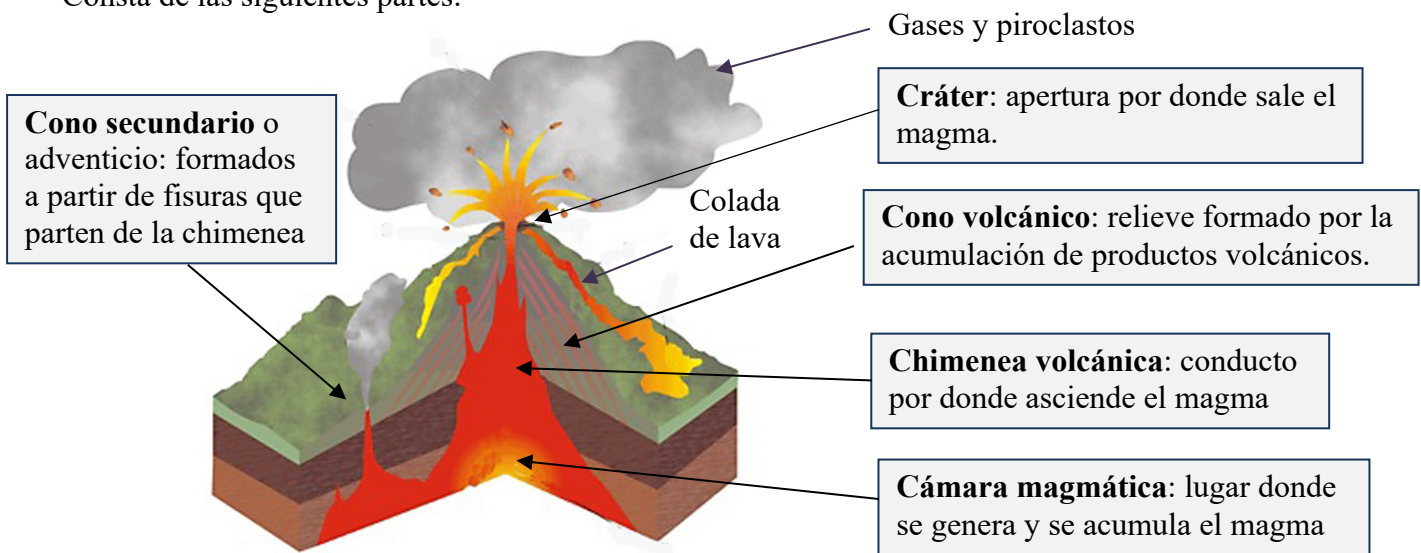
Los magmas que no logran alcanzar la superficie terrestre van a consolidar dentro de la corteza formando grandes masas o intrusiones denominados **plutones**, formados por las rocas magmáticas intrusivas (plutónicas y filonianas). Las distintas estructuras que pueden originar los plutones y que pueden aflorar a la superficie son las siguientes:

1. **Batolitos:** masas de rocas plutónicas de grandes dimensiones (más de 100 Km²) y forma irregular que son discordantes (*cortan los estratos*) con las rocas encajantes.
2. **Lacolitos:** masas de forma lenticular subconcordantes con las rocas encajantes como resultado de la inyección de magma entre los estratos.
3. **Lopolitos o sill:** plutones extensos, pero de poco espesor que se colocan entre los estratos de las rocas encajantes a las que son concordantes.
4. **Diques:** intrusiones estrechas y verticales que atraviesa las estructuras de las rocas encajantes.



4.3 EL VULCANISMO

Los **volcanes** son lugares de la superficie terrestre (aéreos o sumergidos) donde el magma asciende desde el interior de la corteza siguiendo las fracturas que van encontrando. Consta de las siguientes partes:



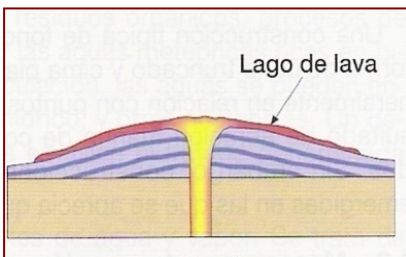
Una **erupción volcánica** es aquel proceso en el que un volcán emite una gran cantidad de materiales, debido a que el magma acumulado en la cámara magmática es impulsado por los gases que contiene. Estos productos son los siguientes:

1. **Gases:** vapor de agua y óxidos de carbono, nitrógeno y azufre. También CH₄ y H₂S. Conforme asciende el magma por la chimenea (y disminuye la presión), los gases se separan en forma de burbujas y alcanzan primero la superficie.

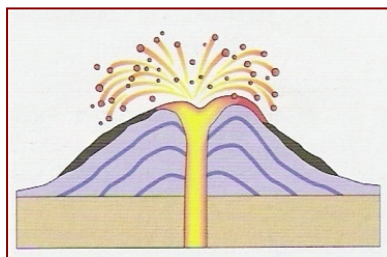
2. **Lava:** porción líquida del magma (sin volátiles) que fluye constituyendo **coladas**. La fluidez es inversamente proporcional a la acidez del magma. Al consolidar generan: **lavas en bloque** (*aa* o malpaíses), **lavas cordadas** (*pahoehoe*) y **lavas almohadilladas** (*pillow lava*). Las coladas de basalto al consolidar producen una **disyunción columnar**, en que las diaclasas formadas por la retracción generan columnas hexagonales.
3. **Rocas piroclásticas:** materiales semifundidos lanzados por el volcán que solidifican en el aire. Por tamaño creciente pueden ser **cenizas** (< 2 mm), **lapilli** (2-64 mm) y **bombas** (> 64 mm).

Un volcán se considera **activo** si ha entrado en erupción durante últimos 10.000 años. Por la salida de materiales, existen dos tipos generales de volcanes:

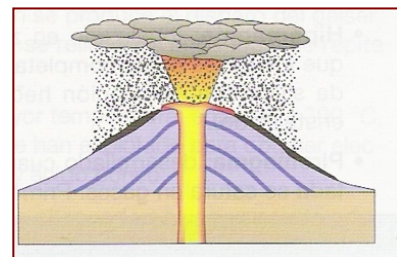
- **Fiisurales:** la emisión de materiales volcánicos se produce a lo largo de fracturas lineales. Son propios de zona de dorsal y forman extensas mesetas (Islandia, península del Deccan en India).
- **Puntuales:** emisiones en torno a un punto concreto. Las erupciones son más violentas cuanto más viscoso (o ácido) sea el magma y mayor contenido en gases tenga. Así se pueden definir varios estilos de erupciones:



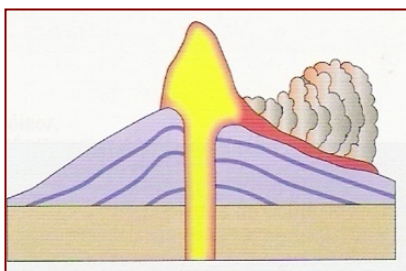
Hawaiano: lava básica fluida y coladas extensas. Son poco explosivas y, por tanto, poco violentas.



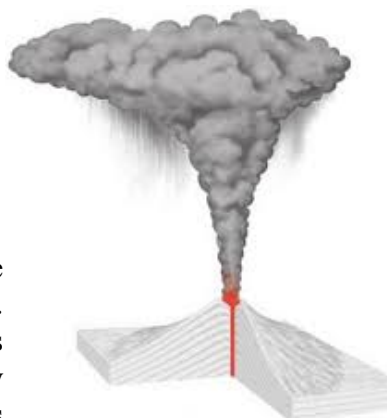
Estromboliano: lava menos fluida con explosiones esporádicas que proyectan piroclastos.



Vulcaniano: lava poco fluida que consolida con rapidez, acompañada de explosiones violentas que forman nubes piroclásticas.



Peleano: lava muy viscosa que solidifica y taponan el cráter. Los gases salen por los laterales de forma muy explosiva en forma de **nubes ardientes**.



Pliniano: lavas muy viscosas en combinación con emisión de gran cantidad de gases, que originan erupciones muy violentas y nubes ardientes de piroclastos que se proyectan a mucha altura. Estas nubes calientes se enfrían y las cenizas caen, pudiendo sepultar grandes superficies.

Las erupciones **freatomagmáticas** se producen al entrar en contacto el magma con agua (del mar, de lagos o subterráneas). El agua líquida se transforma en vapor y la presión se incrementa tanto que se puede producir una explosión tan violenta que puede hacer que salte por los aires buena parte del edificio volcánico (casos de Santorini o el Krakatoa).

En los denominados **supervolcanes**, el magma no puede encontrar una salida hacia la superficie, por lo que se acumula en su cámara. La presión creciente puede formar explosiones colosales que pueden eyectar hacia la estratosfera inmensas cantidades de lava y cenizas que interfieren la luz solar durante largo tiempo y así generar periodos de clima más frío.

La acumulación de productos volcánicos (lava, piroclastos) puede originar diversas **estructuras volcánicas** como las siguientes:



1. **Estratovolcanes:** conos volcánicos de grandes dimensiones, formados por la alternancia de coladas de lava y capas de piroclastos



2. **Escudos volcánicos:** acumulación de lavas muy fluidas, originando conos de base muy ancha. Las **mesetas basálticas** se producen en volcanes fisurales.



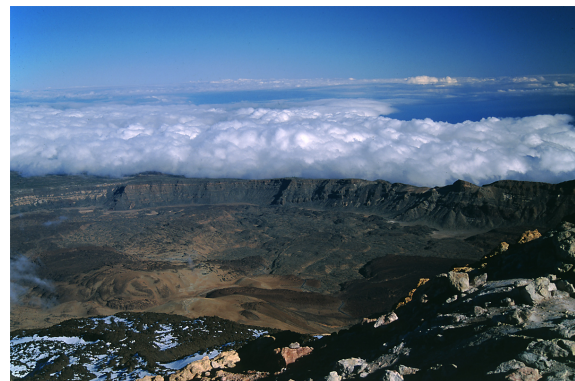
3. **Conos de escorias:** de reducido tamaño y formado sólo por piroclastos.



4. **Chimeneas:** rellenos de la chimenea volcánica que han resistido la erosión del cono al ser más resistentes.



5. **Domos y pitones:** lavas muy viscosas que solidifican en el cráter o en el interior de la chimenea.



6. **Calderas volcánicas:** gigantescos cráteres, de varias decenas de km de diámetro, originados por hundimiento, explosión o erosión.

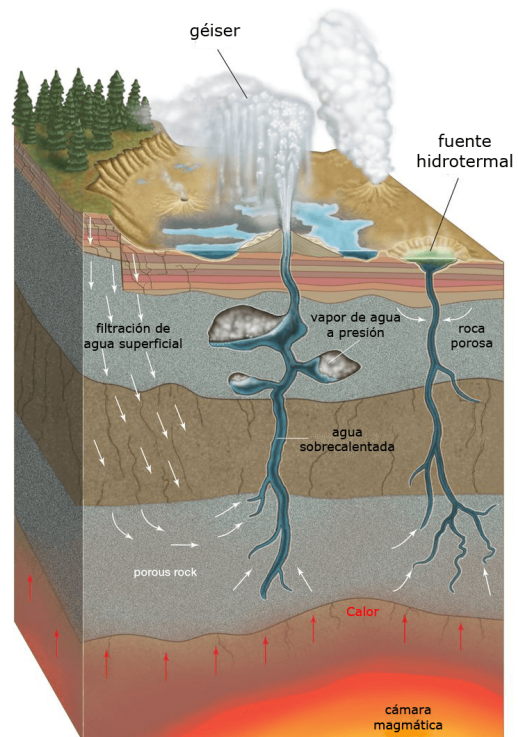
El vulcanismo posteruptivo incluye aquellos fenómenos volcánicos que preceden y se producen después de una erupción. Los más destacables son los siguientes:

1. **Fumarolas:** emisión de gases a altas temperaturas.
2. **Géiseres:** surtidores de vapor de agua, con erupciones periódicas.
3. **Volcanes de lodo:** fluidos hidrotermales a través de barro que forman conos.
4. **Manantiales de aguas termales:** aguas subterráneas calentadas por fenómenos magmáticos.

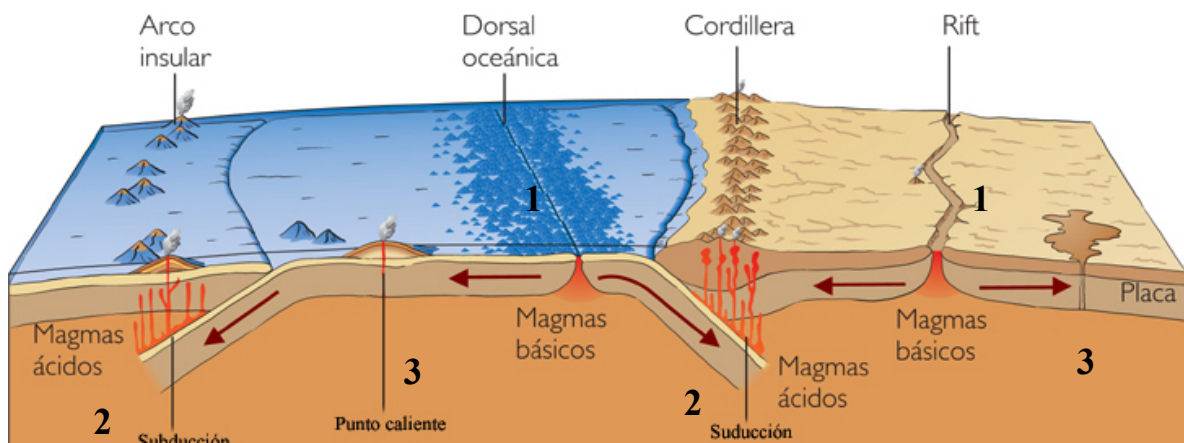
4.3- EL MAGMATISMO Y LA TECTÓNICA DE PLACAS

Los magmas se generan y consolidan gracias al aporte de calor de determinadas zonas de la litosfera:

1. **Límites divergentes (dorsales y rift continental):** lugares donde se produce el ascenso convectivo de materiales procedentes del manto superior. Al disminuir la presión, los materiales de la corteza se funden y generan **magmas básicos** que, al aflorar, originan **basaltos** y **gabros** que forman una nueva corteza oceánica.
2. **Límites convergentes (zonas de subducción):** los basaltos de la placa que subduce arrastran sedimentos con bastante agua. Esto, junto con el aumento de la temperatura con la profundidad y el rozamiento de las placas, funde los materiales para originar **magmas ácidos e intermedios** al incorporar materiales continentales por asimilación magmática o de los sedimentos mencionados anteriormente. La consolidación de estos magmas da origen a rocas plutónicas (granito o diorita) o volcánicas (andesita o riolita).
3. **Zonas intraplaca (puntos calientes):** de una manera similar a las dorsales, el ascenso de materiales del manto puede fundir los materiales corticales y generar magmas básicos. Sobre una placa oceánica dará origen a islas volcánicas alineadas (*Hawai*) y sobre una continental, mesetas basálticas (*Deccan*).



© 2011 Encyclopædia Britannica, Inc.



5- EL METAMORFISMO

5.1 FÍSICO-QUÍMICA DEL METAMORFISMO:

El **metamorfismo** es el conjunto de procesos que conducen a la transformación de rocas preexistentes en nuevas rocas (**metamórficas**), cuando son sometidas a temperaturas y presiones crecientes, aunque sin llegar a su fusión. Estas transformaciones consisten generalmente en:

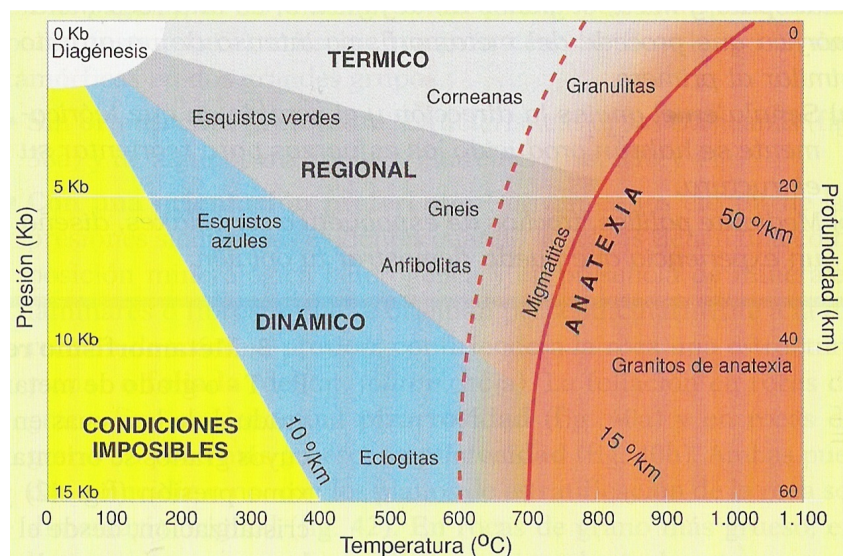
1. **Recristalización** de los minerales, lo que aumenta el tamaño de los cristales, algo visible en la **textura**.
2. **Reorientación** de los granos minerales en sentido perpendicular a los esfuerzos, pudiendo aparecer una **estructura** laminar o bandeada (esquistosidad).
3. **Transformación** de unos minerales en otros más estables en las nuevas condiciones de presión y temperatura. El cambio en la composición mineralógica se puede manifestar en un cambio de **color**.
4. **Aumento de la densidad** (pues disminuye el tamaño de los poros) y de la **tenacidad** de la roca (pues los granos minerales se encuentran fuertemente soldados).

Los principales agentes que inducen el metamorfismo y que pueden actuar separada o conjuntamente, son los siguientes:

- La **temperatura** puede inestabilizar químicamente los minerales cuando varía entre 200 y 700° C, antes de que se produzca su fusión. Puede aumentar por hundimiento de los materiales o por la presencia de un magma.
- La **presión** produce la reorientación de los minerales y puede aumentar por el peso de materiales suprayacentes (presión **litostática**) o por esfuerzos tectónicos tangenciales de compresión o de cizalla (presión **dirigida**).
- La **circulación de fluidos** puede producir cambios químicos en las rocas al producirse el reemplazo de unos átomos por otros de tamaño parecido en un proceso conocido como **metasomatismo**. Estos fluidos proceden del agua a alta temperatura con iones disueltos que circula entre los poros y fisuras de las rocas y que proceden de la roca sedimentaria original o de los volátiles procedentes de un magma al consolidar.

En virtud de las condiciones de presión y temperatura, se distinguen tres tipos de metamorfismo:

1. **Dinámico** o cataclástico en zonas de alta presión y baja temperatura como las zonas de fractura (fallas) en donde los esfuerzos compresivos y la fricción recristalizan la roca. *Millonitas*.
2. **Térmico** o de contacto en lugares de baja presión y alta temperatura. Afecta a las rocas encajantes que rodean a un magma, transformándose en u-



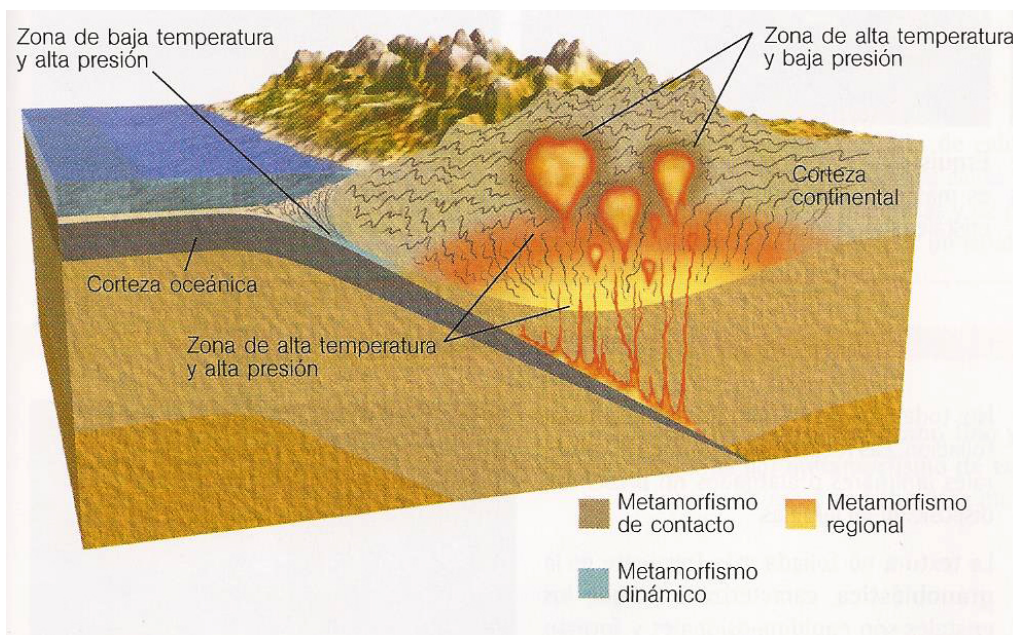
na **aureola metamórfica** en torno a la intrusión, cuyo tamaño varía de unos cm a varios km de espesor. *Corneanas*.

3. El metamorfismo **regional** es el más común y, en este caso, tanto la temperatura como la presión aumenta con la profundidad, lo que incrementa su grado de metamorfismo (orientación y aumento de tamaño de los cristales). Está presente en zonas de subducción y en los núcleos de los orógenos.

5.2 EL METAMORFISMO Y LA TECTÓNICA DE PLACAS

La tectónica de placas permite establecer los lugares de la litosfera terrestre en donde puedan darse alguna de las condiciones necesarias para que se produzca el metamorfismo de las rocas. Estas zonas son las siguientes:

1. **Bordes constructivos** (dorsales): se produce metasomatismo por circulación del agua marina caliente a través de las rocas basálticas de la corteza oceánica.
2. **Bordes pasivos** (fallas transformantes): hay un metamorfismo dinámico a lo largo del plano de falla.
3. **Bordes destructivos**. En ellas diferenciamos estos dos procesos:
 - **Subducción**. Existen varios tipos de metamorfismo según el área:
 - En las fosas oceánicas hay una elevada presión, aunque temperaturas bajas, por lo que existe un metamorfismo regional de bajo grado. *Pizarras y esquistos*.
 - En las raíces de las cordilleras periocénicas y los arcos de islas se produce metamorfismo regional de alto grado (con altas temperaturas y elevadas presiones). *Esquistos, gneises, cuarcitas*.
 - Las bolsas de magmas que ascienden hacia la superficie inducen un metamorfismo de contacto altas temperaturas y bajas presiones. *Corneanas y mármoles*.
 - **Obducción**: tiene lugar un metamorfismo regional de alto grado, dado que alcanzan grandes presiones por el choque de placas continentales y altas temperaturas por el hundimiento de materiales y el plutonismo asociado. *Gneises, mármoles y cuarcitas*.



4. **Zonas intraplaca** (puntos calientes): existe un metamorfismo de contacto asociado a los ascensos de magma. *Corneanas*.

6- LA METEORIZACIÓN

Se define **meteorización** como la alteración *in situ* de la superficie de las rocas por la acción de **agentes atmosféricos** (agua, gases, cambios térmicos, etc). No obstante, el material puede desplazarse hacia abajo por acción de la gravedad, mediante los **fenómenos de ladera** (desprendimientos, deslizamientos, coladas de barro, etc).

Se definen básicamente dos modalidades de meteorización: mecánica y química que producen respectivamente la fragmentación y la alteración química de la roca y, en general, a la primera le sigue la segunda. Un tercer tipo, la meteorización biológica, se puede encuadrar en alguna de las dos mencionadas, pues la acción de los seres vivos puede ser de carácter físico o químico.

6.1 LA METEORIZACIÓN MECÁNICA

Basado en procesos físicos, conducen a la disgregación o fragmentación de la roca, sin alterar su composición. Se definen las siguientes modalidades:

1. **Gelivación o crioclastia:** fragmentación de la roca a causa del hielo-deshielo, originando acumulaciones de bloques o **canchales** (zonas de alta montaña o de clima frío).
2. **Haloclastia:** precipitación de sales en grietas en los que ha entrado agua salada (localidades costeras).
3. **Termoclastia** por expansión térmica al someter las rocas a una elevada oscilación térmica (zonas desérticas).
4. **Descompresión** de rocas originadas a gran profundidad (rocas plutónicas y metamórficas) cuando afloran a la superficie, por lo que generan lajas y diaclasas.
5. **Acción de seres vivos**, especialmente por el mecanismo de cuña que ejercen las raíces de los árboles al crecer.



Canchal (o glera) en el Pirineo

2.2 LA METEORIZACIÓN QUÍMICA

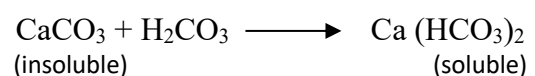
Las reacciones químicas que se establecen entre los minerales de las rocas con componentes atmosféricos (agua, O₂, CO₂) generan nuevos minerales y, por tanto, se altera la composición química de la roca. Estas reacciones químicas pueden ser las siguientes:

1. **Oxidación** de los minerales de una roca (especialmente los que contienen hierro) por el O₂ del aire o disuelto. *Olivino o Magnetita a Hematites o limonita.*



Resultado de la carbonatación en el Torcal de Antequera

2. **Disolución** por el agua de minerales solubles (yeso o halita).
3. **Carbonatación:** disolución de rocas carbonatadas (calizas) por parte del agua carbónica (CO₂ disuelto en H₂O).



4. **Hidratación:** incorporación de agua en la estructura mineral, por lo que aumentan su volumen. *Arcillitas y yesos.*

5. **Hidrólisis:** rotura de la estructura molecular de los silicatos al reaccionar con el agua (o el agua carbónica). Es el origen de algunas arcillitas (minerales de arcilla):



6. **Acción bioquímica** de los seres vivos, generalmente por liberación de ácidos orgánicos o CO_2 , que atacan a las rocas.

2.3 CONSECUENCIAS DE LA METEORIZACIÓN

1. Aparición de una geomorfología dependiente de la litología:

- En granitos se originan característicos conjuntos de formas redondeadas como los **berrocales**, las **pedrizas** y las **rocas caballeras**.
- En las calizas se forma el **exokarst** (lapiaces, dolinas) y el **endokarst** (simas, cuevas) por la carbonatación de aguas superficiales y subterráneas respectivamente.
- En rocas metamórficas, se produce **lajamiento**.
- La disyunción de lavas al consolidar genera **columnas basálticas**.



Columnas basálticas en torno a la cascada Svartifoss (Islandia)



Berrocal (La Pedriza, Madrid)



Roca caballera (La Pedriza, Madrid)



Exokarst: lapiaz (Castillo Mayor, Sobrarbe)



Endokarst: cuevas

2. Acumulación de una cubierta de alteración sobre la roca madre. Los **regolitos** están formados por fragmentos de la roca madre (meteorización física) y las **alteritas** por minerales neoformados (por meteorización química). Si no se produce su erosión, esta cubierta de alteración es la base de la formación de un suelo.
3. La meteorización química genera soluciones acuosas de iones, que se incorporan al suelo o a la hidrosfera. Son de gran importancia para la nutrición de los productores de ecosistemas terrestres y acuáticos, y para los organismos que producen esqueletos y conchas. Por otra parte, estas soluciones iónicas son las que, al precipitar, cementan las partículas de sedimentos durante la diagénesis.

7- LA ACCIÓN DE LOS AGENTES GEOLÓGICOS EXTERNOS

Los **agentes geológicos externos** son aquellos que modelan el relieve mediante los procesos de erosión, transporte y sedimentación. Se originan gracias a la dinámica de las capas fluidas terrestres (atmósfera e hidrosfera) impulsada por el aporte energético del sol. Estos agentes son los siguientes: los ríos, las aguas salvajes, los glaciares, el mar, el viento y las aguas subterráneas. Cada uno de ellos va a generar unos relieves característicos de cada uno de ellos, lo que deducir la acción de cada agente a partir de la interpretación del paisaje.

7.1- EROSIÓN, TRANSPORTE Y SEDIMENTACIÓN

La **erosión** es el desgaste de las rocas debido a la evacuación de los materiales por parte de los agentes geológicos externos. Esta acción puede ser mecánica, en la que se movilizan fragmentos de rocas originados por la meteorización denominados **clastos** o química, si existe alteración mineralógica de las rocas al ser desgastadas. La erosión depende de estos dos factores:

1. La **energía del agente geológico**, que procedente en última instancia del Sol.
2. La **resistencia de las rocas** a la erosión (su competencia), relacionada con su coherencia.

COMPETENTES (<i>duras</i>)	NO COMPETENTES (<i>blandas</i>)
Granito, caliza, arenisca, conglomerado, cuarcita, basalto	Arcilla, marga, pizarra, cenizas volcánicas.

El **transporte** es el traslado de los materiales erosionados del lugar de erosión al lugar de sedimentación, que es la **cuenca sedimentaria**). Se realiza mediante corrientes de agua (por disolución, suspensión, saltación, rodadura y arrastre), fenómenos de ladera o gravitacionales, por el viento, por arrastre glaciar o mediante la dinámica marina (olas, mareas y corrientes). Durante el transporte los clastos pueden sufrir procesos de:

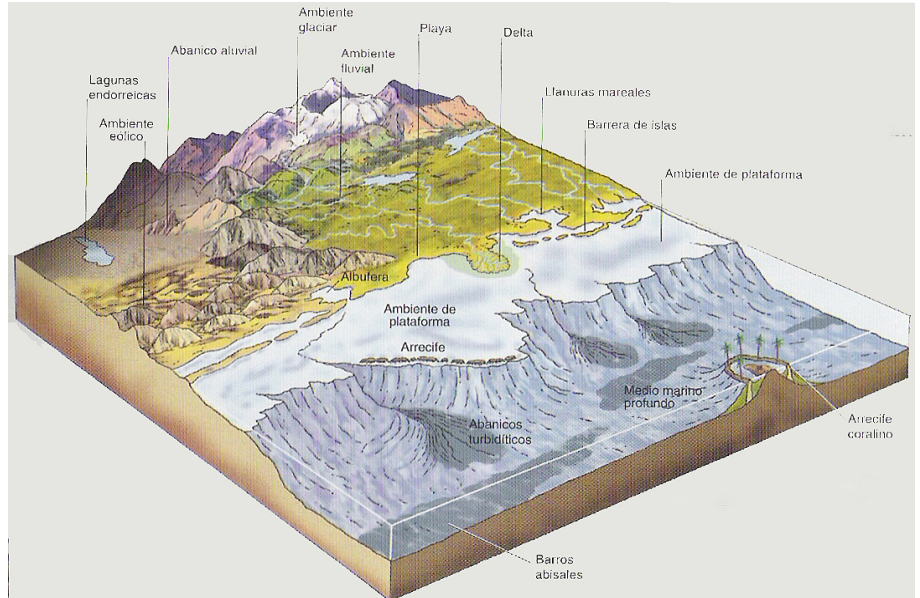
- **Selección** por tamaño, de tal modo que los de mayor tamaño son los que se depositan primero. Hay agentes geológicos selectivos como los ríos, el viento y el mar, y agentes no selectivos como los glaciares y los torrentes (debido a su elevada energía).
- **Maduración**, proceso consistente en cambios de forma, composición y tamaño de los sedimentos. Puede ser **textural** (reducción y redondeamiento de los sedimentos debido al golpeo entre sí o con el lecho, proceso que depende del agente geológico y de la duración del transporte) o **mineralógica** (alteración química de algunos minerales como los feldspatos, que generan minerales de arcilla y liberan minerales que permanecen estables como el cuarzo).

La sedimentación es el depósito de los productos resultantes de la destrucción de las rocas (los **sedimentos**). Por su origen, éstos pueden ser **detríticos** (fragmentos de rocas), **químicos** (iones disueltos en el agua) o **biológicos** (restos orgánicos o estructuras esqueléticas inorgánicas).

En el caso de los sedimentos detríticos y restos orgánicos, el depósito se produce cuando disminuye la energía del agente transportador y se puede producir por dos mecanismos: **decantación** por caída vertical al frenarse la corriente, o **acreción cinética** debido al choque con algún obstáculo. Por otra parte, los iones precipitan cuando se dan condiciones fisicoquímicas favorables.

El lugar donde un agente geológico concreto deposita los sedimentos recibe el nombre de **cuenca sedimentaria**. Cada una de estas cuencas se pueden encuadrar en un **ambiente o medio sedimentario**, que se define como el conjunto de zonas de la superficie terrestre donde se dan las condiciones físicas, químicas y biológicas para que se produzca la sedimentación. Se encuadran en tres grandes tipologías:

3. **Continental**: regiones emergidas, en donde la sedimentación es un proceso menos importante que la meteorización y la erosión. Los sedimentos son de tamaño grueso y medio. Se definen seis ambientes sedimentarios continentales: *Glaciar, fluvial, lacustre, palustre, eólico y kárstico*.



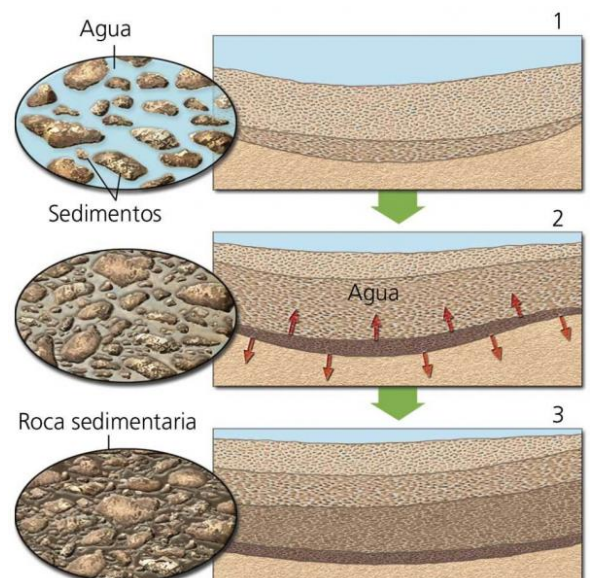
4. **De transición**: corresponden a las costas. Los sedimentos son de tamaño fino y medio. *Playas, marismas, albuferas, estuarios y deltas*.

5. **Marinos**: corresponden a océanos y mares, en donde los procesos de sedimentación son los predominantes. Los sedimentos son detríticos de grano fino y de precipitación química o bioquímica. Aquí se encuadran medios de *plataforma, talud, fondo abisal y arrecifal*.

7.2- LA DIAGÉNESIS

Se denomina **diagénesis** o litificación al conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que sufren los sedimentos en su transformación en **rocas sedimentarias**. Se producen bajo unas condiciones relativamente reducidas de presión y temperatura. Se distinguen los siguientes procesos:

1. **Compactación** por el incremento de la presión litostática ejercida por el peso de los materiales que se van depositando por encima. El volumen de los poros del sedimento se reduce y el agua contenida en ellas es expulsada. El sedimento aumenta su densidad y reduce su porosidad, espesor y volumen.
2. **Cementación**. Casi simultáneamente al proceso anterior, se produce la precipitación del material soluble (iones) contenido en el agua que circula al ser expulsada de los poros. Esto produce un cemento que rellena estos poros y une las partículas del sedimento. Los cementos más habituales son: CaCO_3 , SiO_2 , CaSO_4 , óxidos de hierro y arcillas.

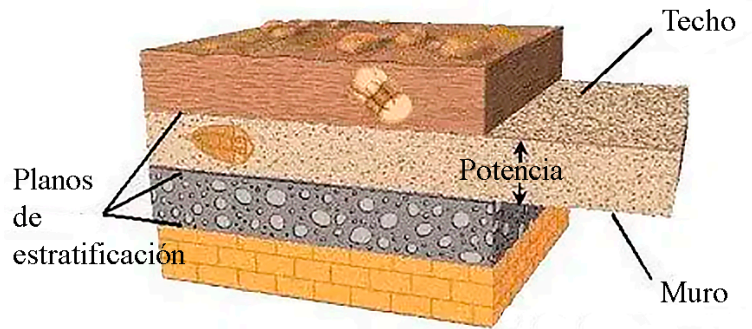


3. **Reemplazamiento** de unos minerales por otros al reaccionar las partículas del sedimento con los fluidos circulantes.

7.3 ESTRUCTURAS SEDIMENTARIAS

Entre ellas, la más destacable es la **estratificación**, en que las rocas se disponen y ordenan en capas o **estratos**, separados entre sí por superficies de discontinuidad que son los **planos de estratificación**. De este modo, cada estrato correspondería a un período de sedimentación más o menos continuo.

En un estrato se definen varios elementos: **techo** (plano superior), **muro** (plano inferior) y **potencia** (grosor). En general los estratos se forman horizontales y paralelos entre sí, de modo que los inferiores son más antiguos que los superiores, aunque pueden aparecer inclinados, plegados o invertidos, a causa de deformaciones o presentar discordancias por fenómenos de erosión, fracturación, e intrusión.



La **estratigrafía** es la disciplina geológica que estudia la estratificación de una zona. Las **secuencias estratigráficas** están formadas por la sucesión de dos o más estratos separados por sus planos de estratificación. La sucesión de varias de estas secuencias, separadas entre sí por interrupciones de la sedimentación o por procesos erosivos, constituye una **serie estratigráfica**, que se representa gráficamente en la **columna estratigráfica**. Con los datos recogidos por la estratigrafía, se puede dar una idea de las condiciones en la que se formaron las rocas estudiadas que, junto con datos paleontológicos, permiten reconstruir la historia de la Tierra.

Un **fósil** es un resto de un organismo o una huella de su actividad correspondiente a un ser vivo de épocas pasadas que se ha conservado en los sedimentos. Existen dos grandes grupos de fósiles:

1. **Restos de organismos**: habitualmente **partes duras** que no se descomponen (huesos, dientes, conchas, exoesqueletos y caparazones), aunque excepcionalmente pueden fosilizar **partes blandas**.
2. **Iconofósiles**, correspondientes a huellas de la presencia o actividad de un ser vivo, como pisadas de vertebrados (**icnitas**), **impresiones** de vegetales, **rastrros** de invertebrados (de desplazamiento, de alimentación o habitáculos), **coprolitos** (excrementos fosilizados), **gastrolitos** (fragmentos rocosos utilizados en la trituración de alimentos), huevos, nidos, etc.

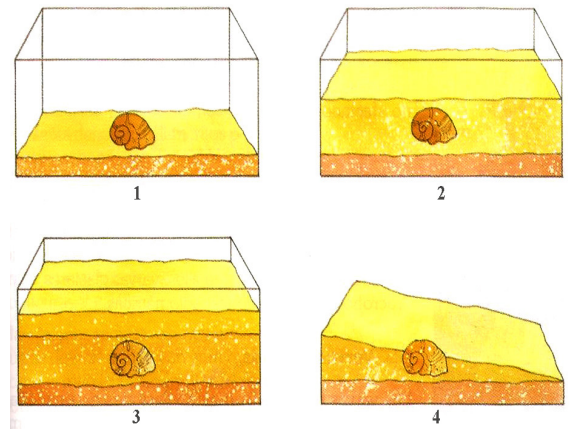
Aparte se encontrarían las estructuras derivadas de la conservación de materia orgánica como la deshidratación (momificación), la congelación o la inclusión materiales asépticos como asfaltos o ámbar (resina fósil).

El proceso de fosilización incluye las siguientes etapas:

1. **Depósito** de los restos orgánicos sobre el fondo del medio en que viven
2. **Enterramiento** relativamente rápido de estos restos por sedimentos de tal modo que se evita su destrucción por carroñeros, agentes atmosféricos o microorganismos.

3. **Transformación** química de los restos, reemplazando la materia orgánica por minerales, pero manteniendo la forma original del ser vivo. Se puede realizar de las siguientes maneras:

- La materia orgánica que no se descompone es sustituida directamente por minerales (por ejemplo, la madera se convierte en xilópalo).
- Reordenación de la estructura cristalina de las partes duras (recristalización).
- Sustitución en las partes duras de unos minerales por otros (carbonatos o fosfatos de calcio, sílice o pirita).
- Disolución de la estructura y relleno del molde resultante.



4. **Afloramiento** en superficie de los fósiles por erosión y/o levantamiento tectónico.

8- LA INTERACCIÓN ENTRE LOS PROCESOS INTERNOS y EXTERNOS

Aunque tradicionalmente se le da a la **denudación** (acción de la meteorización y de la erosión) un papel destructivo o modelador del relieve, una concepción más moderna e integradora permitiría asignar un papel en la construcción y rejuvenecimiento del relieve.

La **isostasia** es la situación de equilibrio por la que el peso ejercido sobre la base del manto es igual en cualquier zona de la Tierra. En virtud de este principio,

- Bajo las cordilleras (y los continentes en que están alojados), se encuentran raíces corticales para compensar el exceso de masa de las montañas.
- Los fondos oceánicos presentan una corteza delgada puesto que el defecto de masa se compensa con una mayor cantidad de materiales densos del manto situados debajo.

Por tanto, la isostasia se uniría a una serie de procesos que producen la **elevación y hundimiento** de la corteza continental, como son:

- El abombamiento asociado al ascenso de penachos térmicos (puntos calientes)
- Las colisiones continentales (obducción)
- El arrastre continental que ejerce la subducción (hundimiento) y que puede producir un efecto rebote (ascenso) al cesar.

La elevación de la corteza continental incrementa el efecto de la denudación del relieve puesto que:

1. El incremento en altura modifica el clima hacia una disminución de las temperaturas y una mayor cuantía de las precipitaciones. Se activa la crioclastia, la disolución, la hidrólisis y la erosión glaciar.
2. La topografía se hace más abrupta, lo que reactiva los fenómenos de ladera y la erosión fluvial.

Todo esto lleva a un rejuvenecimiento general del relieve por encajamiento de redes fluviales y a una relación recíproca entre denudación y orografía, que, en un ciclo de retroalimentación, lleva al adelgazamiento de la corteza.

La erosión desgasta las montañas (A), por lo que éstas ascienden isostáticamente a la par que las cuencas sedimentarias se hunden (subsistencia) al acumular sedimentos (B). Este levantamiento reactiva la erosión que, a su vez, induce un nuevo ajuste isostático de menor intensidad y a una mayor acumulación y subsidencia de los sedimentos. El resultado final es una homogenización del relieve, formando un escudo o cratón, y también del grosor de la corteza continental (C).

