

TEMA 8. METAMORFISMO Y ROCAS METAMÓRFICAS

Las enormes presiones y temperaturas que dominan en el interior de la Tierra transforman las rocas existentes en otras nuevas, tanto en su aspecto como en su composición mineral e, incluso, su composición química.

Las rocas así formadas son rocas metamórficas, muy abundantes en la corteza continental y el manto. Por ello, del estudio de estas rocas puede aprenderse mucho de los procesos que tienen lugar en estas capas de la Tierra.

1. METAMORFISMO

Las rocas metamórficas siempre se forman a partir de otra roca, la **roca madre** o **protolito**. El metamorfismo provoca cambios mineralógicos, texturales y químicos. Sus causas están en el aumento de temperatura y presión, así como la presencia de fluidos activos.



Al cambiar drásticamente las condiciones ambientales, las rocas existentes se vuelven inestables, dando lugar a nuevas rocas. Este proceso de cambio sucede a una profundidad de varios kilómetros y llega hasta el manto superior.

El metamorfismo suele ser gradual, empezando por cambios pequeños (*metamorfismo de grado bajo*), hasta llegar a grandes cambios (*metamorfismo de grado alto*). En el primer caso, las diferencias entre la roca madre y la nueva roca metamórfica apenas son perceptibles; en el metamorfismo de alto grado, los cambios en la roca son tan importantes que puede hacerse imposible saber cuál fue la roca madre.

En general, el metamorfismo tiene lugar en uno de tres ambientes posibles:

1. Cuando una masa magmática intruye en las rocas provoca un aumento local de la temperatura, dando ***metamorfismo de contacto o térmico***.
2. La circulación de fluidos hidrotermales, ricos en iones, puede alterar la composición química de las rocas. Es el ***metamorfismo hidrotermal***.
3. La formación de montañas, sobre todo en los límites de placa convergentes, provoca aumentos de presión y temperatura, dando ***metamorfismo regional***.

2. FACTORES DEL METAMORFISMO



Factores básicos del metamorfismo son el *calor*, la *presión* y los *fluidos químicamente activos*, variando su papel de unos ambientes a otros.

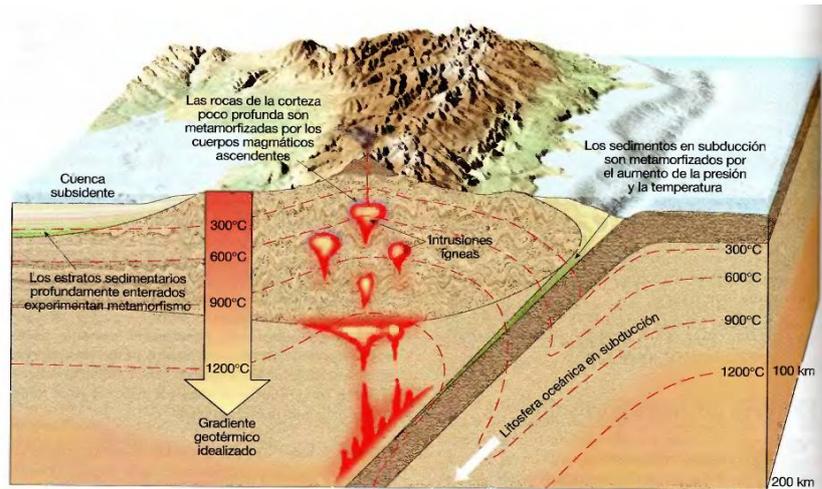
2.1. EL CALOR

El *calor* es el factor principal del metamorfismo, ya que permite el movimiento de iones que lleva a la recristalización y formación de nuevos minerales.

2.1.1. CAMBIOS PROVOCADOS POR EL CALOR

Por una parte, el calor facilita la recristalización de minerales de grano fino o de precipitados, formando cristales mayores.

Además, el aumento de temperatura puede hacer inestables los minerales, con lo que sus componentes se reordenan y aparecen cristales nuevos, más estables en las nuevas condiciones. La migración de iones puede llevar incluso a un cambio en la composición química global.



2.1.2. FUENTES DE CALOR

La energía térmica del interior terrestre y la liberada por la desintegración radiactiva son las fuentes principales de calor.

A medida que las rocas de la corteza se introducen en el interior de la Tierra, aumenta la temperatura según el *gradiente geotérmico*. Al llegar a los 150 °C o 200 °C (a unos 8 kilómetros de profundidad), los minerales arcillosos se vuelven inestables, dando **clorita** y **moscovita**. Otros silicatos, como cuarzo y feldespatos, permanecen estables hasta mucha más profundidad.

Las zonas de subducción y de colisión continental son lugares donde las rocas corticales se introducen a gran profundidad y sufren gran metamorfismo.

Por otra parte, las plumas de calor ascendentes en las dorsales y en las zonas de subducción, transportan el calor del manto a zonas de la corteza, provocando metamorfismo.

2.2. PRESIÓN Y ESFUERZO DIFERENCIAL

La profundidad también provoca un aumento de la presión, generando en las rocas una **presión de confinamiento**, análoga a la presión hidrostática, y que tiene lugar en todas las direcciones. Esta presión no pliega las rocas, pero puede hacerlas más compactas y provocar recristalización.

En los bordes de placas convergentes, en cambio, las presiones son dirigidas, diferentes según la dirección, y se llaman **esfuerzo diferencial**. Como estas fuerzas suelen ser más o menos horizontales, el resultado es un plegamiento de las rocas, que se acortan horizontalmente y se engrosan verticalmente.

En zonas superficiales las rocas están más frías y se comportan de manera frágil, por lo que los esfuerzos diferenciales tienden a fracturarlas, triturando y pulverizando los granos minerales. A mayor profundidad, las altas temperaturas hacen que las rocas sean dúctiles, por lo que se deforman y fluyen.

2.3. FLUIDOS QUÍMICAMENTE ACTIVOS

Los fluidos formados por agua y compuestos volátiles, como el dióxido de carbono, tienen un importante papel en el metamorfismo. Actúan como catalizadores de la recristalización y la migración iónica. Donde dos granos minerales se tocan la presión es mayor, por lo que los fluidos migran llevándose iones disueltos hacia zonas de menor presión, donde precipitan. De esta forma los granos minerales tienden a recristalizar y alargarse perpendicularmente a los esfuerzos compresivos.

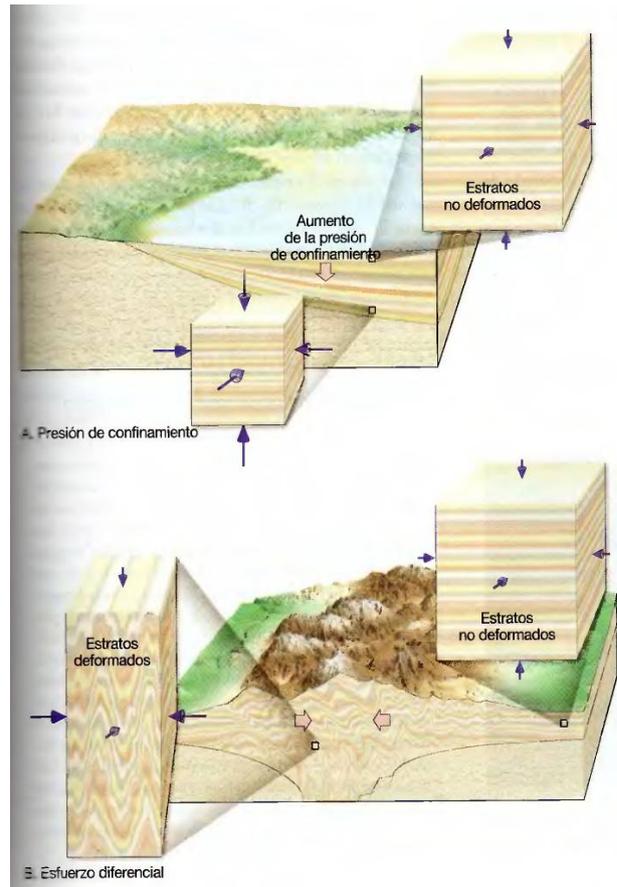
Si los fluidos escapan de un plutón ígneo, pueden recorrer bastante distancia y precipitar en rocas con composición muy diferente, alterándola químicamente. Ese proceso metamórfico se denomina **metasomatismo**.

Estos fluidos proceden de la deshidratación de rocas sedimentarias e ígneas bajo condiciones de alta temperatura.

2.4. IMPORTANCIA DEL PROTOLITO

Las rocas metamórficas suelen tener una composición química (aunque no mineralógica) muy similar a la de la roca de la cual proceden, aunque pueden haber perdido volátiles como agua y dióxido de carbono.

Por otra parte, los minerales que forman el protolito influyen en el grado de metamorfismo. Minerales poco reactivos, como el cuarzo, favorecen pocos cambios; mientras que las calizas con minerales de arcilla sufren cambios profundos.



3. TEXTURAS METAMÓRFICAS

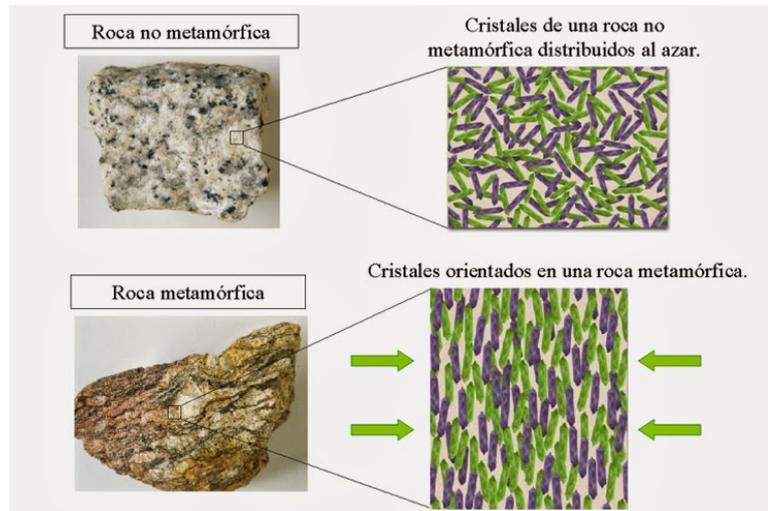
Textura es un término que en geología hace referencia al tamaño, forma y distribución de las partículas de una roca. Al contrario que en rocas sedimentarias e ígneas, los minerales de las rocas metamórficas, si son planares (micas) o alargados (anfíboles), tienen casi siempre una *orientación* preferente, colocándose de forma paralela o subparalela. Se dice que estas rocas poseen *foliación*.

3.1. FOLIACIÓN

La **foliación** es la disposición planar de los granos minerales o estructuras de una roca. Es típica, aunque no exclusiva, de las rocas metamórficas formadas por metamorfismo regional, con esfuerzos compresivos.

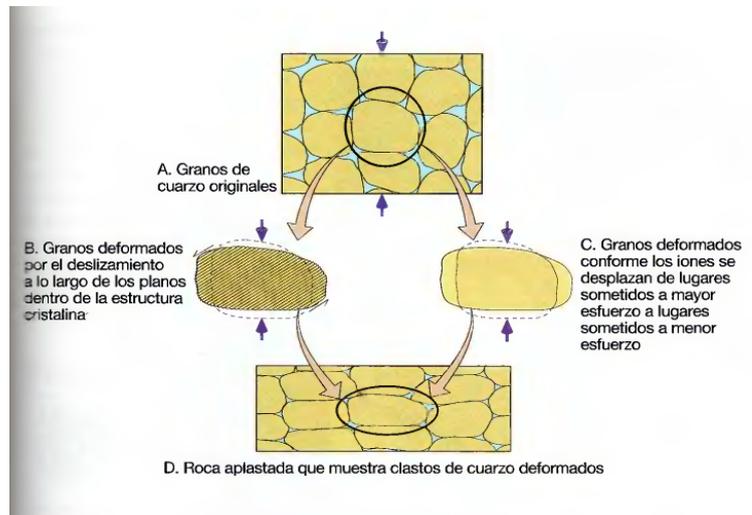
Existen tres mecanismos básicos que llevan a la foliación de las rocas:

- a) **Rotación de granos minerales alargados o planares:** la alineación es perpendicular a la dirección del acortamiento máximo. Se da en metamorfismo de grado bajo pues, en el resto, son más habituales otros mecanismos.



- b) **Recristalización de los minerales con orientación preferente:** en condiciones de elevada presión y temperatura, los granos minerales originales pueden disolverse y migrar a otro lugar, donde precipitan y recrystalizan. Cuando esta recrystalización se acompaña de plegamiento, durante el metamorfismo, la recrystalización tiene lugar en una dirección preferente, perpendicular al esfuerzo máximo.

- c) **Cambios de forma de los granos minerales:** se da sobre todo en minerales de cuarzo, calcita y olivino. Éstos, bajo presión, desarrollan granos alargados paralelos al aplastamiento máximo. Puede suceder por flujo plástico de unidades cristalinas, con rotura de enlaces y formación de otros nuevos; o bien por migración de iones desde zonas de alta presión a otras de presión menor (sería una recrystalización, en la que pueden intervenir los fluidos químicamente activos).



3.2. TEXTURAS FOLIADAS

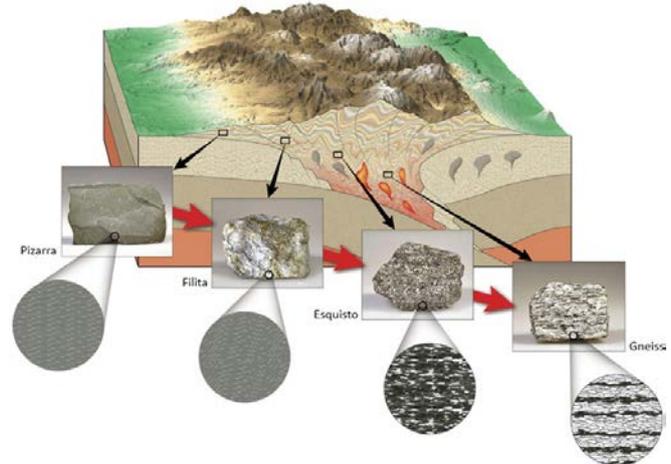
Según el grado de metamorfismo y la mineralogía de las rocas, hay varios tipos de foliación:

3.2.1. PIZARROSIDAD

Son superficies planares muy juntas que se separan en capas delgadas con mayor o menor dificultad. El caso más claro se da en las pizarras, donde la pizarrosidad se llama **clivaje**.

En metamorfismo de grado bajo la lutita, y rocas semejantes, se convierten en pizarra. Primero, los granos planares se pliegan y doblan, dando pliegues microscópicos con flancos alineados. Posteriormente, los granos minerales se rompen y recrystalizan según la nueva dirección desarrollada.

Se forman así estrechas zonas paralelas con micas, separadas por otras zonas más anchas con cuarzo y otros minerales no planares. En las zonas delgadas es donde se da la separación en capas típica de la pizarra. Esquistos y gneises también pueden mostrar clivaje.



3.2.2. ESQUISTOSIDAD

Si las condiciones de metamorfismo son más intensas, los granos de mica y clorita crecen hasta hacerse visibles, mostrando estructura laminar. Este tipo de foliación se denomina **esquistosidad**. Las rocas que lo muestran, los **esquistos**, suelen tener granos de cuarzo o feldespato en forma de lente entre las micas.



3.2.3. BANDEADO GNÉISICO

Si el metamorfismo es de alto grado, los minerales claros (cuarzo y feldespatos) y oscuros (biotita) tienden a separarse en bandas paralelas, dando el **bandeado gnéisico** o **foliación** (en sentido estricto). Estas rocas se llaman **gneises** y no suelen mostrar clivaje.



3.3. OTRAS TEXTURAS METAMÓRFICAS

Las rocas metamórficas sin foliación se denominan **no foliadas**. Se forman en ambientes con poca deformación y donde la roca original presenta granos equidimensionales de calcita o cuarzo. Así, a partir de una caliza de grano fino se origina el **mármol**.

Otra textura típica es la **porfidoblástica**, caracterizada por granos muy grandes rodeados de una matriz de otros más finos. Los minerales de **granate**, **estauroлита** y **andalucita** suelen dar este tipo de granos grandes (porfidoblastos).



4. ROCAS METAMÓRFICAS COMUNES

Las rocas metamórficas suelen clasificarse según su textura (foliación) y composición química del protolito.

4.1. ROCAS FOLIADAS

4.1.1. PIZARRA

Roca foliada de granos de mica muy finos. Tiene tendencia a romperse en láminas planas. Se origina por metamorfismo de bajo grado en lutitas o cenizas volcánicas. Las hay negras (con materia orgánica), rojas (óxido de hierro), verdes (clorita), ...



4.1.2. FILITA



Es un caso intermedio entre pizarra y esquisto, con minerales algo mayores que los de la pizarra. Se distingue por su brillo satinado y superficie ondulada. Suele mostrar pizarrosidad.

4.1.3. ESQUISTO

Son rocas de grano medio a grueso, con predominio de minerales planares (moscovita y biotita), que le dan textura foliada, y otros como cuarzo y feldespatos. Suelen formarse por metamorfismo de grado medio sobre lutitas.

Existen muchas variedades: *micaesquisto* (con micas), *micaesquisto granatífero* (con porfidoblastos de granate), *micaesquisto estauroolítico* (con porfidoblastos de *sillimanita*), *esquistos cloríticos* o *verdes* (con clorita), *talcoesquistos* (con talco), etc. Los que contienen *grafito* se utilizan para lapiceros, fibra de carbono y lubricantes.



4.1.4. GNEIS

Rocas bandeadas de grano medio a grueso (cuarzo, feldespato potásico y plagioclasa). Suelen contener minerales planares (biotita, moscovita, anfíbol), que pueden darle pizarrosidad. Pueden formarse a partir de granitos y riolitas o por metamorfismo de grado alto en lutitas.



4.1.5. MIGMATITAS



En los ambientes más extremos, hasta las rocas metamórficas de alto grado pueden cambiar. Así, un gneis sometido a muy alta temperatura puede empezar a fundir. Pero como primero funden los minerales de bajo punto de fusión (minerales claros, como el cuarzo y los feldespatos), el resto (minerales oscuros como anfíbol y biotita) puede permanecer sólidos.

Al enfriarse, las bandas claras serán de aspecto ígneo y las oscuras, metamórfico. Además, las bandas claras suelen presentar pliegues muy tortuosos con inclusiones tabulares oscuras.

Estas rocas, a medio camino entre las metamórficas y las ígneas, se llaman **migmatitas**.

Nombre de la roca	Textura	Tamaño de grano	Observaciones	Protolito
Pizarra	Foliada	Muy fino	Pizarrosidad excelente, superficies lisas sin brillo	Lutitas, pelitas
Filita		Fino	Se rompe a lo largo de superficies onduladas, brillo satinado	Pizarra
Esquisto		Medio a grueso	Predominan los minerales micáceos, foliación escamosa	Filita
Gneis		Medio a grueso	Bandeado composicional debido a la segregación de los minerales	Esquisto, granito o rocas volcánicas
Migmatita		Medio a grueso	Roca bandeada con zonas de minerales cristalinos claros	Gneis, esquisto
Milonita	Poco foliada	Fino	Cuando el grano es muy fino, parece sílex, suele romperse en láminas	Cualquier tipo de roca
Metaconglomerato		De grano grueso	Cantos alargados con orientación preferente	Conglomerado rico en cuarzo
Mármol	No foliada	Medio a grueso	Granos de calcita o dolomita entrelazados	Caliza, dolomía
Cuarcita		Medio a grueso	Granos de cuarzo fundidos, masiva, muy dura	Cuarzoarenita
Corneana		Fino	Normalmente, roca masiva oscura con brillo mate	Cualquier tipo de roca
Antracita		Fino	Roca negra brillante que puede mostrar fractura concoide	Carbón bituminoso
Brecha de falla		Medio a muy grueso	Fragmentos rotos con una disposición aleatoria	Cualquier tipo de roca

4.2. ROCAS NO FOLIADAS

4.2.1. MÁRMOL

Roca de grano grueso derivada de calizas o dolomías. La caliza pura da mármol blanco, muy apreciado, pero muchas veces contiene impurezas que originan mármol rosa, gris, verde, negro, etc.

4.2.2. CUARCITA

Roca muy dura formada a partir de arenisca rica en cuarzo. La cuarcita pura es blanca, aunque las hay rosadas y grises.

5. AMBIENTES METAMÓRFICOS

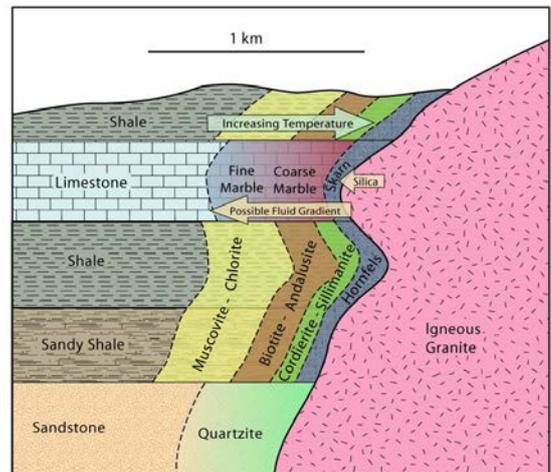


El metamorfismo es típico de los límites de placas y asociado a magmatismo, pero varía de unos ambientes a otros.

5.1. METAMORFISMO TÉRMICO O DE CONTACTO

Se produce por el aumento de temperatura cuando un magma invade una roca caja, en la que se forma una zona de alteración llamada **aureola**. Ésta puede tener de centímetros a kilómetros, según el tamaño del cuerpo magmático, la composición de la roca caja y la cantidad de agua presente.

Si la aureola es grande, dentro de ella hay varios grados de metamorfismo. En general las rocas formadas, muy variadas, se llaman **corneanas**.

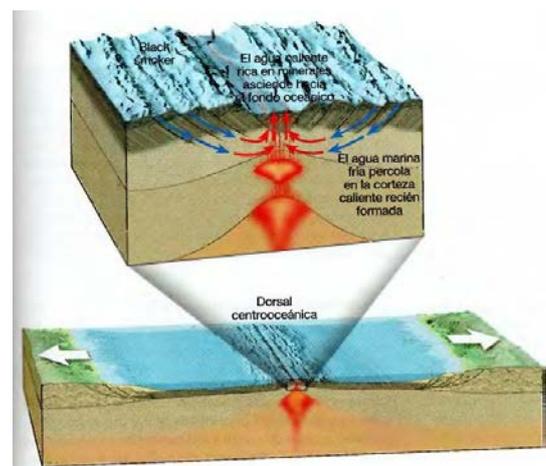


5.2. METAMORFISMO HIDROTHERMAL

Este metamorfismo se produce cuando fluidos calientes, ricos en iones, circulan por las fisuras de las rocas. Está relacionado con la actividad ígnea y, de hecho, suele darse donde hay grandes plutones. Al enfriarse éstos se liberan iones y volátiles, que forman **soluciones hidrotermales** que, además de alterar a la roca caja, pueden precipitar y formar depósitos minerales de interés económico.

En rocas permeables, como las calizas, los fluidos pueden extender su acción a kilómetros, además de mezclarse con los carbonatos y dar rocas llamadas **skarn** mediante metasomatismo.

La mayor parte del metamorfismo hidrotermal y el metasomatismo se da en las dorsales oceánicas, donde el agua marina contribuye a la difusión de los iones y al enriquecimiento en sodio de muchas rocas cálcicas.



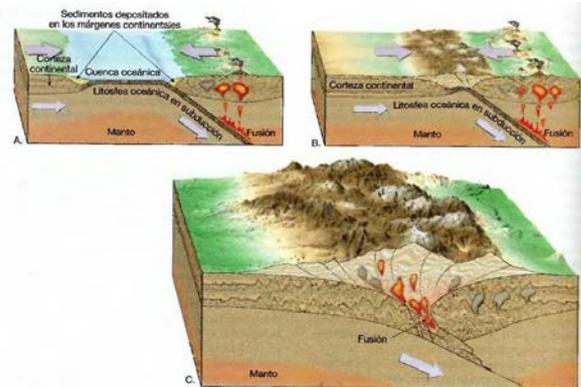
Además, se disuelven grandes cantidades de metales como hierro, cobre, cobalto, níquel, plata y oro, que salen a la superficie en forma de nubes de partículas llamadas *fumarolas oceánicas* que, al precipitar, pueden dar depósitos metálicos importantes.

5.3. METAMORFISMO REGIONAL

Es el típico de los límites de placa convergentes, bien en zonas de subducción o en choques continentales. La mayoría de las rocas metamórficas se forma así.

En el choque continental se forman cordilleras intracontinentales y hay grandes fuerzas compresivas y, debido al engrosamiento de la corteza y el enterramiento profundo de muchas rocas, un gran aumento de temperatura, que produce gran metamorfismo junto a magmatismo.

Las rocas metamórficas e ígneas así formadas constituyen el núcleo de estas montañas.



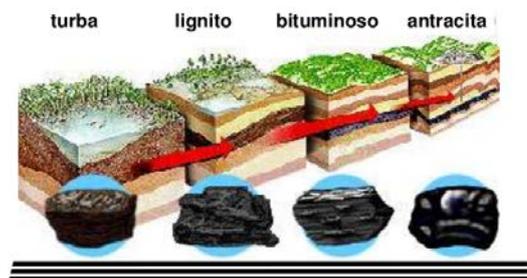
5.4. OTROS TIPOS DE METAMORFISMO

5.4.1. METAMORFISMO DE ENTERRAMIENTO

En las cuencas sedimentarias, la acumulación de sedimentos puede llevar a condiciones de metamorfismo de grado bajo en las capas inferiores. No suele darse deformación, pero sí recristalización y cambio de textura (**antracita**).

Suele aparecer a partir de los 8 kilómetros (100 – 200 °C), aunque en zonas de elevado gradiente geotérmico puede darse a menor profundidad.

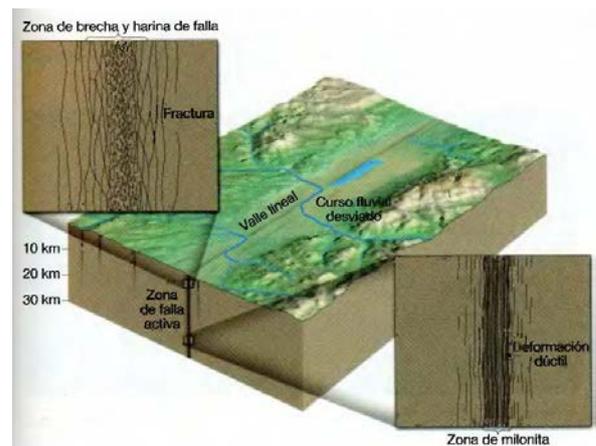
Series del Carbón.



5.4.2. METAMORFISMO DINÁMICO (METAMORFISMO EN ZONAS DE FALLA)

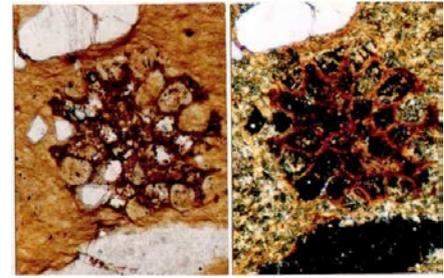
En la superficie, a lo largo de las fallas, las rocas son fracturadas y pulverizadas, originando rocas poco consistentes llamadas **brechas de falla**. A mayor profundidad se forma material muy fino y poco consolidado: **harina de falla**. A gran

profundidad hay una deformación dúctil de los minerales preexistentes, originando rocas con granos alargados y de aspecto foliado: **milonitas**.



5.4.3. METAMORFISMO DE IMPACTO

Se produce por el choque de meteoritos en la superficie terrestre. Se forman rocas pulverizadas, fracturadas y fundidas, que suelen originar vidrios.



6. ZONAS METAMÓRFICAS

En las zonas donde actúa el metamorfismo puede observarse una variación sistemática de la textura y la mineralogía de las rocas, dependiendo del grado de metamorfismo sufrido.

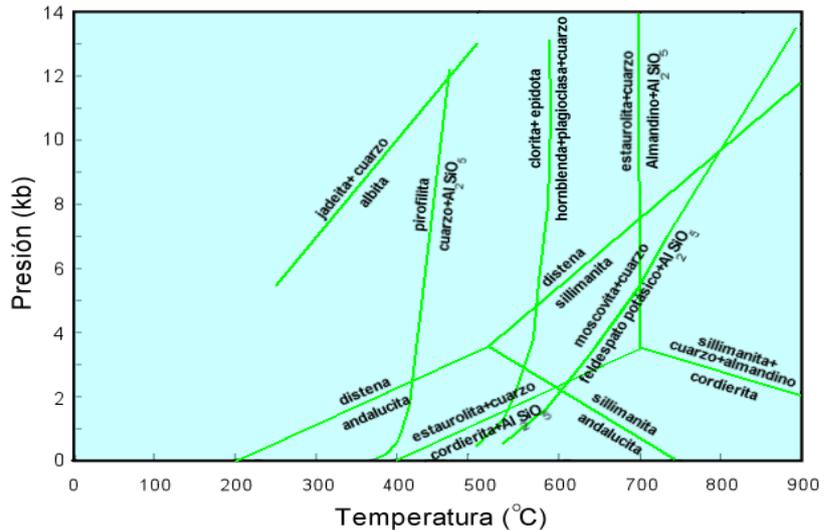
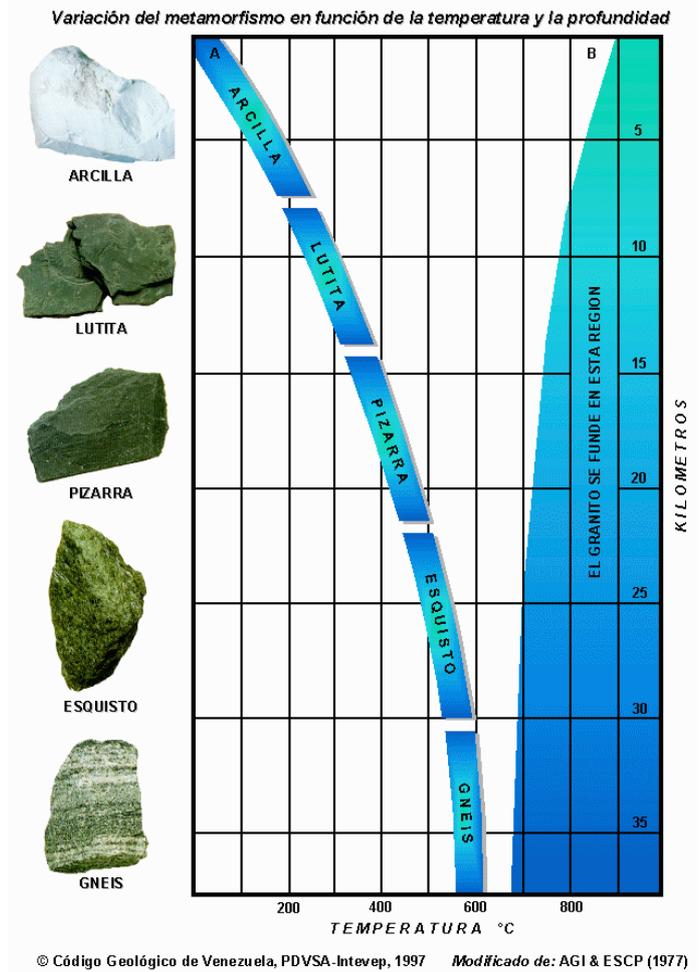
6.1. VARIACIONES DE TEXTURA

La intensidad del metamorfismo suele ir acompañada de un aumento del tamaño de grano de la roca. Así, una lutita se convierte progresivamente en **pizarra** (grano fino), **filita**, **esquistos** (grano grueso) y **gneis** (capas de minerales claros y oscuros).

6.2. MINERALES ÍNDICE DEL GRADO DE METAMORFISMO

Al igual que la textura, también existe un cambio mineralógico según el grado de metamorfismo. En una lutita, aparecen, sucesivamente, **clorita**, **moscovita**, **biotita**, **granate**, **estaurrolita** y, finalmente, cerca del punto de fusión, **sillimanita**, mineral usado para fabricar porcelanas refractarias.

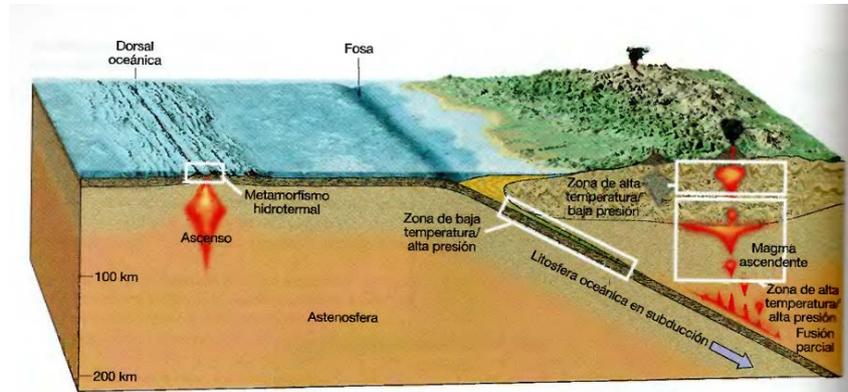
Estos minerales son buenos indicadores de la presión y la temperatura en la que se formaron las rocas que los contienen y, por eso, se denominan **minerales índice**. Así, las rocas con clorita (formadas a 200 °C o menos: pizarras) serían rocas de *bajo grado* de metamorfismo; en cambio, las rocas con sillimanita (formada a 600 °C o más: gneis, migmatitas), son de *alto grado*.



7. METAMORFISMO Y TECTÓNICA DE PLACAS

La mayoría del metamorfismo se da en límites de placa. En divergentes (dorsales), metamorfismo hidrotermal y de contacto (térmico). En los pasivos (fallas transformantes), metamorfismo dinámico. Sin embargo, la mayor parte del metamorfismo tiene lugar en los bordes convergentes.

En algunos límites convergentes chocan dos placas continentales, formando montañas donde se comprimen y deforman los bordes de las placas y los sedimentos acumulados en los márgenes continentales. Los Alpes, el Himalaya, los Pirineos y los Apalaches son ejemplos notables.

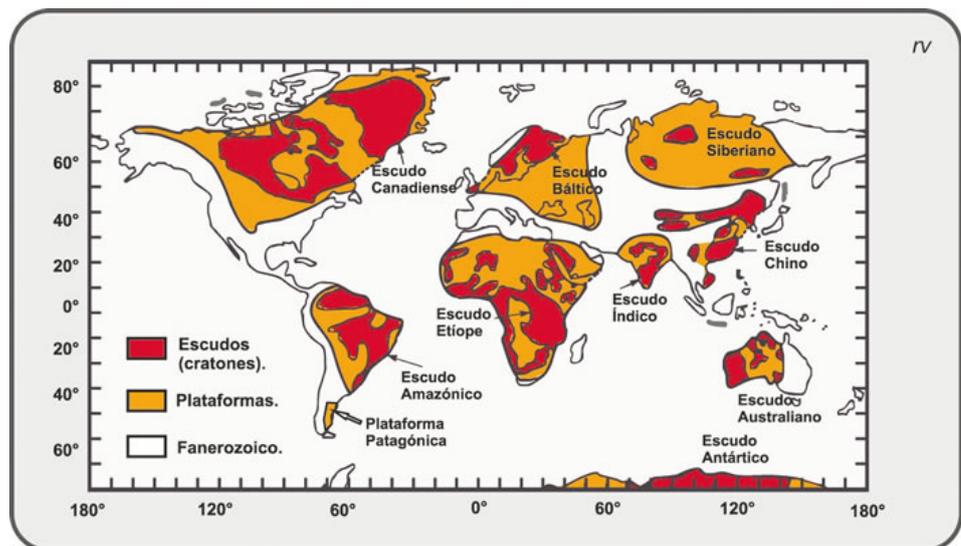


Pero también hay metamorfismo a gran escala en las zonas de subducción. Aquí se dan diversos grados de metamorfismo.

Cerca de la fosa hay baja temperatura y alta presión, formando rocas como los *esquistos azules*, ricos en anfíboles. A mayor profundidad, a lo largo del plano de subducción (plano de Benioff), se da un incremento notable de la presión y de la temperatura, con fusión parcial e intenso metamorfismo regional. La roca fundida asciende a la superficie, formando cordilleras volcánicas pericontinentales (Andes, Montañas Rocosas) o arcos de islas (Japón, Kuriles), y originando un metamorfismo de alta temperatura y baja presión (metamorfismo de contacto).

7.1. AMBIENTES METAMÓRFICOS ANTIGUOS

Aunque los cinturones de rocas metamórficas de las cordilleras son muy extensos, existen mayores cantidades aún de rocas metamórficas en el interior estable de los continentes: son los **escudos**. Estas estructuras planas están formadas por rocas metamórficas y plutones ígneos asociados y son las zonas con las rocas más antiguas halladas hasta la fecha (hasta 3.800 millones de años). Se supone que son restos de periodos muy antiguos de formación de montañas, lo que apoyaría la teoría de que la tectónica terrestre empezó en una edad muy temprana del planeta.



Contenido

1. METAMORFISMO	1
2. FACTORES DEL METAMORFISMO	2
2.1. EL CALOR.....	2
2.1.1. Cambios provocados por el calor.....	2
2.1.2. Fuentes de calor	2
2.2. PRESIÓN Y ESFUERZO DIFERENCIAL	2
2.3. FLUIDOS QUÍMICAMENTE ACTIVOS	3
2.4. IMPORTANCIA DEL PROTOLITO	3
3. TEXTURAS METAMÓRFICAS	4
3.1. FOLIACIÓN	4
3.2. TEXTURAS FOLIADAS	5
3.2.1. Pizarrosidad.....	5
3.2.2. Esquistosidad	5
3.2.3. Bandeado gnéisico	5
3.3. OTRAS TEXTURAS METAMÓRFICAS	5
4. ROCAS METAMÓRFICAS COMUNES	6
4.1. ROCAS FOLIADAS	6
4.1.1. Pizarra	6
4.1.2. Filita	6
4.1.3. Esquisto.....	6
4.1.4. Gneis	6
4.1.5. Migmatitas	7
4.2. ROCAS NO FOLIADAS	8
4.2.1. Mármol.....	8
4.2.2. Cuarzita	8
5. AMBIENTES METAMÓRFICOS	8
5.1. METAMORFISMO TÉRMICO O DE CONTACTO	8

- 5.2. METAMORFISMO HIDROTERMAL 8
- 5.3. METAMORFISMO REGIONAL..... 9
- 5.4. OTROS TIPOS DE METAMORFISMO..... 9
 - 5.4.1. Metamorfismo de enterramiento 9
 - 5.4.2. Metamorfismo dinámico (metamorfismo en zonas de falla) 9
 - 5.4.3. Metamorfismo de impacto 10
- 6. ZONAS METAMÓRFICAS..... 10
 - 6.1. VARIACIONES DE TEXTURA 10
 - 6.2. MINERALES ÍNDICE DEL GRADO DE METAMORFISMO..... 10
- 7. METAMORFISMO Y TECTÓNICA DE PLACAS..... 11
 - 7.1. AMBIENTES METAMÓRFICOS ANTIGUOS..... 11