

Fundamentos de **PETROLOGÍA METAMÓRFICA**

Carlos Alberto García Ramírez

Ediciones
UIS

Universidad
Industrial de
Santander



Portada

Fundamentos de petrología metamórfica

Carlos Alberto García Ramírez



Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga, 2022

Página legal

GARCÍA RAMÍREZ, CARLOS ALBERTO

Fundamentos de petrología metamórfica / Carlos Alberto García Ramírez

Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2022

219 p.: il., diagrs., tablas

ISBN IMPRESO:

ISBN EPUB: 978-958-5188-35-8

1. PETROLOGÍA 2. METAMORFISMO (GEOLOGÍA) 3. ROCAS CRISTALINAS Y METAMÓRFICAS

CDD : 552.4 Ed. 23

CEP - Universidad Industrial de Santander. Biblioteca Central

Fundamentos de petrología metamórfica

Carlos Alberto García Ramírez
Profesor, Universidad Industrial de Santander

© Universidad Industrial de Santander
Reservados todos los derechos

ISBN: 978-958-5188-35-8
Primera edición, mayo de 2022

Diseño, diagramación e impresión:
División de Publicaciones UIS
Carrera 27 calle 9, ciudad universitaria
Bucaramanga, Colombia
Tel.: (60 7) 6344000, ext. 1602
ediciones@uis.edu.co

Prohibida la reproducción parcial o total de esta obra, por cualquier medio, sin autorización escrita de la UIS.

Impreso en Colombia

Dedicatoria

A mi esposa, Alla, y a mi hijo, Andrés
A la memoria de mis padres
A mis hermanos

Agradecimientos

A la memoria del profesor Vladlen Nikitich Troshenko de la Universidad Nacional de Krivoi Rog, Ucrania, por haber sido mi maestro y haber despertado mi interés en las rocas metamórficas; por ser mi guía y orientador durante mis estudios de pregrado y doctorado.

A la Universidad Industrial de Santander por haberme otorgado el tiempo en modalidad de año sabático para elaborar este libro.

Valoro significativamente las discusiones y acompañamiento en campo de mis colegas del Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada - GIGBA, que han sido aportes importantes en el desarrollo de esta obra.

Para mis colegas de la Escuela de Geología, gratitud enorme por su apoyo y compañía.

Especial agradecimiento a los geólogos María Paula Rey Román y Juan Pablo Jaimes por su colaboración en la elaboración de algunos gráficos.

Agradecimiento a todas las personas que de diferente manera han hecho posible la elaboración de este libro y a las cuales no menciono directamente por temor a omitir algún nombre.

Prólogo

El metamorfismo es un proceso geológico fascinante y único, que contribuye significativamente en la formación de corteza continental y oceánica y en la concentración de mineralizaciones de interés económico. Adentrarse en el estudio de las rocas metamórficas es tratar de develar los misterios de buena parte de la evolución de nuestro planeta. Estos aspectos relacionados al metamorfismo son fuente de inspiración inagotable para el geólogo y fue el primer empuje que recibí para acometer la elaboración de esta obra.

Desde mis años de pregrado sentí especial interés por la petrología, alentado en este propósito por ese gran maestro, el profesor Vladlen Nikitich Troshenko, quien compartía de forma muy generosa sus conocimientos invaluable con todos sus estudiantes y a quien tuve la fortuna de tener como director de mi trabajo de pregrado y mi tesis doctoral en el Instituto de Minería de Krivoi Rog, Ucrania, hoy denominado Universidad Nacional de Krivoi Rog.

Años más tarde, en la Escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander - UIS he continuado mi desempeño académico como profesor de tiempo completo y como investigador. En torno a la investigación y como fundador del Grupo de Investigación en Mineralogía, Petrología y Geoquímica - MINPETGEO, hoy Grupo de Investigación en Geología Básica y Aplicada – GIGBA, emprendimos con los profesores Luis Carlos Mantilla y Carlos Alberto Ríos el estudio de los procesos metamórficos, metasomáticos e hidrotermales en el Macizo de Santander. En estos quehaceres de la investigación, parte fundamental la han constituido también nuestros estudiantes de pregrado y posgrado.

En la primera etapa de mi formación profesoral elaboré los manuales de prácticas de la asignatura Petrología Metamórfica. Sentía igualmente la necesidad de escribir un libro de texto que fuera soporte y apoyo para los estudiantes en el curso teórico y que los ayudara en la comprensión de los principios básicos del metamorfismo. Consciente de esto último, sabía que el libro texto debía contener también mis propias experiencias como

investigador.

Afortunadamente en la consolidación del libro texto de forma decidida tuve la colaboración de mis colegas de GIGBA y de la Escuela de Geología a través de discusiones académicas en diferentes escenarios. Las ideas acerca del metamorfismo han sido también nutridas por las conversaciones y tertulias que he tenido con diferentes profesionales de la comunidad geológica del país y el exterior. Al respecto debo decir que son tantos y tan valiosos estos especialistas que por temor a omitir algún nombre no los menciono, pero a quienes de forma personal siempre les he expresado mi gratitud.

Transcurridos 28 años de carrera universitaria siento que las clases impartidas de metamorfismo y las investigaciones adelantadas en diferentes complejos metamórficos de Ucrania y Colombia, son la base para integrar los principios fundamentales del metamorfismo en un libro que contribuya a la formación profesional de los estudiantes de geología de la UIS y del país.

Entrego entonces a los geólogos en formación de la UIS y del país, así como a profesionales e investigadores del metamorfismo, una obra que espero siga avivando ese interés en el estudio de tan grandioso proceso geológico.

El autor
Floridablanca, 8 de agosto de 2021

Introducción

La presente obra aborda uno de los procesos más intrigantes de la geología como lo es el metamorfismo. El metamorfismo es un proceso geológico ampliamente difundido a través de la historia geológica de la Tierra y gran actor en su constitución. Testimonio de esto es el hecho de que las rocas metamórficas constituyen el 27,4 % del volumen de la corteza. El metamorfismo también ocurre en condiciones del manto superior. El papel protagónico del metamorfismo en la estructura de la Tierra se manifiesta igualmente en su capacidad para formar y reconcentrar mineralizaciones.

En este libro se presentan las bases de la petrología metamórfica, y a lo largo de la obra el lector encontrará ejemplos de rocas metamórficas y procesos asociados en el territorio colombiano.

El primer capítulo aborda las generalidades del metamorfismo, su definición y relación con los procesos diagenéticos y magmáticos. El segundo capítulo identifica y describe las causas del metamorfismo. La roca parental o protolito es tema del tercer capítulo. En el cuarto capítulo se presenta la forma como se clasifican las rocas metamórficas. El quinto capítulo es dedicado a describir los atributos estructurales, microestructurales y texturales de las rocas metamórficas. En el capítulo 6 se analizan las rocas metamórficas como sistemas químicos en equilibrio. El capítulo 7 se dedica a presentar y describir los principales grupos composicionales de las rocas metamórficas en diferentes condiciones de presión y temperatura. Finalmente, en el capítulo 8 se analizan los diferentes ambientes geodinámicos en que ocurre el metamorfismo.

Espero que este libro sea un aporte a la formación de los estudiantes de geología y una invitación para que estos prosigan sus estudios, profundizando sus conocimientos en este apasionante tema.

El autor

Generalidades del metamorfismo

Definición de metamorfismo

El metamorfismo es uno de los procesos geológicos más importantes que ocurren en la Tierra. La relevancia de un proceso geológico puede ser considerada a partir de unos criterios subjetivos por definición, pero objetivos en su aplicación y valoración. Entre estos criterios se podrían considerar los siguientes: 1) el papel del proceso en mención como formador de rocas; 2) la capacidad de producir y concentrar mineralizaciones; y 3) cómo este proceso puede influir en nuestra vida cotidiana. De acuerdo con estos criterios, podemos decir que los procesos metamórficos son grandes constructores de corteza continental y oceánica. Las rocas metamórficas constituyen el 27,4 % en volumen de la corteza. Adicional a esto, existen rocas metamórficas y procesos presentes también en el manto. La existencia de un gran número de yacimientos minerales, algunos de estos de talla mundial como los BIF (*banded iron formations*), evidencia la capacidad de acumular y reconcentrar elementos, minerales y rocas que pueden ser explotables económicamente. Igualmente, algunos atributos de las rocas metamórficas como la esquistosidad, orientación preferencial de minerales, grado de metamorfismo, entre otros, deben ser considerados durante el procesamiento mineral y el diseño de plantas de separación mineral. Las obras de infraestructura como vías, puentes, edificaciones, represas, etc., representan motor de desarrollo económico y social. Cuando estas obras se construyen en terrenos conformados por rocas metamórficas requieren de especial atención por cuanto las estructuras como esquistosidad constituyen planos de debilidad y partición de las rocas que pueden afectar la estabilidad de las obras.

La amplia distribución de las rocas metamórficas en la Tierra son el resultado de gran variedad de procesos asociados de carácter endógeno y exógeno. Algunos de ellos vinculan o son reflejo de la interacción entre diferentes planetas y cuerpos extraterrestres de nuestro sistema solar como es el caso del metamorfismo de impacto. Igualmente, el metamorfismo

ocurre en una amplia diversidad de ambientes geodinámicos bajo condiciones variadas de presión/temperatura (P/T).

¿Cómo se podría definir el metamorfismo? En la literatura científica existen numerosas definiciones de metamorfismo. En este trabajo, acogemos la definición de metamorfismo propuesta por la subcomisión en rocas metamórficas (SCMR, siglas en inglés) de 2007. Ver en las referencias como Smulikowski *et al.* (2007). El metamorfismo según la SCMR es definido como:

Proceso que involucra cambios en la mineralogía y/o textura de una roca en estado sólido. El proceso se debe principalmente al reajuste de la roca a las condiciones físicas diferentes a aquellas bajo las cuales se formó y que también son diferentes a las condiciones físicas que normalmente ocurren en la superficie de la Tierra y durante la diagénesis. El proceso puede coexistir con fusión parcial y puede también involucrar cambios en la composición química global de la roca.

De esta definición de metamorfismo, podemos resaltar los siguientes aspectos:

- El proceso ocurre en estado sólido.
- Los cambios en la roca pueden ser estructurales y/o texturales y/o mineralógicos.
- La composición química de la roca se mantiene estable, excepto la fase fluida H₂O, CO₂ y otros volátiles.
- Si bien algún tipo de metamorfismo se presenta en la superficie de la Tierra, los agentes que la causan son externos a esta (meteoritos, rayos). Esto quiere decir que del concepto de metamorfismo se excluyen procesos superficiales como intemperismo o cercanos a la superficie como la diagénesis.
- El proceso puede coexistir con fusión parcial.
- Bajo ciertas condiciones, el metamorfismo involucra cambios en la composición química global de la roca (elementos mayores, menores). Este proceso es conocido como metasomatismo.

Límites del metamorfismo

Definir los límites inferior y superior del metamorfismo es una tarea compleja por lo extenso del proceso, alta variabilidad (litologías, condiciones P-T, escala de tiempo) y los ambientes geológicos donde ocurre el metamorfismo. Los límites del metamorfismo no corresponden a valores precisos e inequívocos de temperatura y presión, y cuando estos se proponen, se aclara la condición subjetiva y arbitraria de estos valores y que deben ser considerados como referencia para algunos grupos composicionales o ambientes geodinámicos específicos.

El límite inferior del metamorfismo comprende cambios mineralógicos, de fase o cristalinidad en algunos minerales como la illita; reorganización de interestratificados de illita/esmectita. Este tipo de cambios posdiagenéticos a metamórficos están bien registrados en rocas pelíticas. En este mismo tipo composicional la aparición del mineral pirofilita indicaría el inicio del metamorfismo. Transformaciones de la materia orgánica, cambios en el color de alteración de elementos conodontales y cambios en el color de foraminíferos, polen y esporas han sido relacionados con incremento de la temperatura a niveles considerados propios del metamorfismo.

La primera ocurrencia de minerales como carfolita, pirofilita, lawsonita, phrenita, pumpellyita, anfíbol sódico, paragonita o estilpnomelana indican que la roca sufrió cambios metamórficos. En este caso, se debe tener cuidado porque estos minerales también pueden aparecer como detríticos. Un estudio textural detallado ayuda a definir la naturaleza de estos minerales (Bucher y Grapes, 2011).

El límite inferior termal del metamorfismo ha sido fijado arbitrariamente en $150^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ (Bucher y Grapes, 2011).

El límite superior termal del metamorfismo está relacionado con las temperaturas registradas en rocas metamórficas de la corteza continental inferior, las cuales varían entre 750 y 850°C . Sin embargo, temperaturas superiores a 900°C han sido determinadas en metapelitas peraluminicas, granulitas máficas y rocas calcosilicatadas dando lugar a lo que Harley (1998) denominó metamorfismo de ultra altas temperaturas. En condiciones del manto, procesos metamórficos pueden ocurrir hasta temperaturas de aproximadamente 1500°C .

El límite inferior de presión está registrado en rocas metamórficas de la corteza superior a profundidades muy someras y las cuales fueron metamorfizadas por el efecto termal causado por intrusiones magmáticas. Según Bucher y Grapes (2011), a estas condiciones, la presión es de unos pocos megapascales.

El límite superior de presión fue definido inicialmente en 1,0 GPa, condiciones de la base de la corteza continental a unos 30-40 km de profundidad. El hallazgo de coesita en los Alpes Occidentales en el Macizo Dora Maira (Chopin, 1984; Smith, 1984) y microdiamantes en el Macizo de Kokchetav, Kazajstan (Sobolev, 1990) en rocas corticales indica presiones de al menos 3,0 GPa y 6,0 GPa, respectivamente, para la formación de estos minerales, condiciones que ocurren a profundidades entre 150 y 250 km como mínimo. Los hallazgos de coesita y microdiamantes dieron lugar a lo que hoy se conoce como metamorfismo de ultra altas presiones.

En la Figura 1, se presentan las condiciones en las cuales ocurre el metamorfismo y su relación con procesos como la diagénesis y el magmatismo. La Figura 1 muestra también la relación diagénesis-metamorfismo (límite inferior del metamorfismo). Una vez inicia el metamorfismo, este proceso es predominante hasta la curva del solidus del granito hidratado, a partir de la cual el magmatismo aparece y comparte campo termal (650°C y 1800°C) con el metamorfismo. En este campo compartido entre metamorfismo y magmatismo la fusión parcial de rocas metamórficas puede ocurrir a temperaturas iniciales de aproximadamente 650°C. Los procesos de fusión parcial de las rocas metamórficas forman granitos anatóxicos y migmatitas.

Tipos de metamorfismo

Los procesos de metamorfismo han sido objeto de diversas clasificaciones. Estas clasificaciones se han basado en aspectos tales como la extensión del proceso, intensidad del metamorfismo (relación P/T), duración del evento metamórfico, causa del proceso. Clasificar el metamorfismo ha sido una tarea complicada, pero en los últimos años la comunidad geológica ha logrado consensos en torno a considerar la extensión del proceso como el primer criterio para su división. De acuerdo con esto, existen dos tipos de metamorfismo: regional y local; y para cada uno de estos tipos de metamorfismo se definen subtipos de acuerdo con las causas del metamorfismo en combinación con el ambiente geológico (Figura 2).

A continuación, se presenta una breve característica de los diferentes

tipos de metamorfismo según la SCMR (2007).

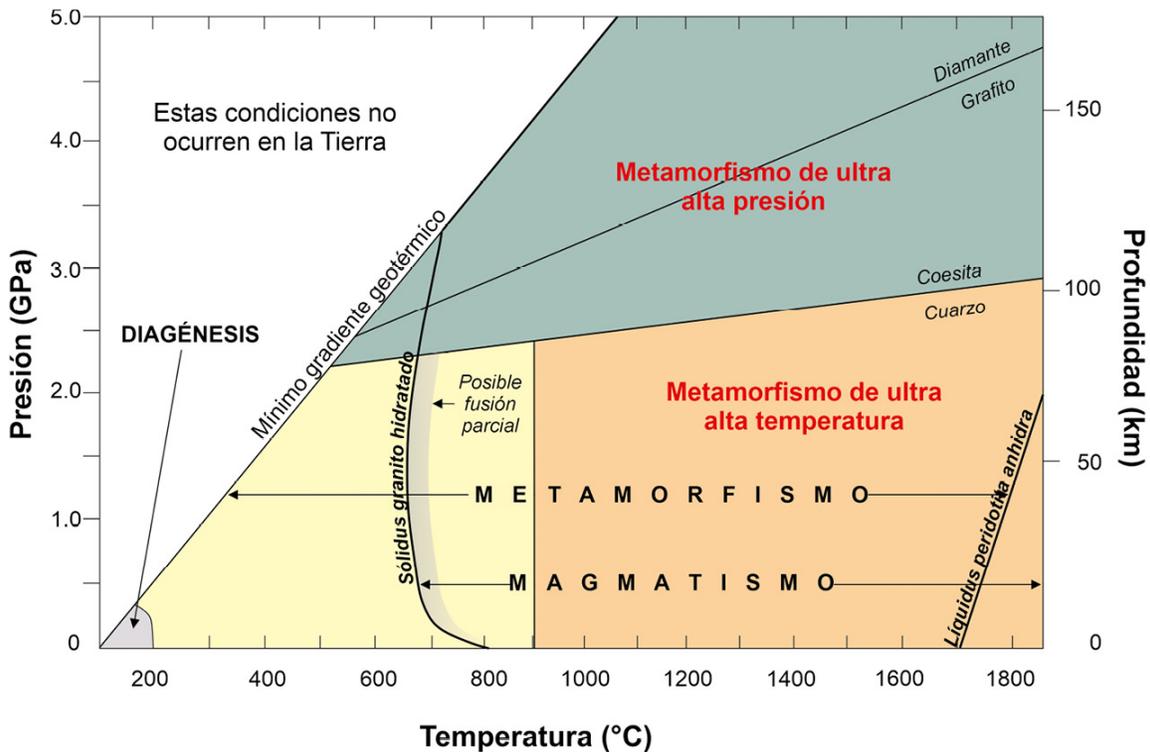


Figura 1. Límites del metamorfismo y relación con la diagénesis y el magmatismo. Modificado de Gómez (2006).

Metamorfismo regional

Ocurre en extensas áreas, afectando grandes volúmenes de roca, y está asociado a procesos tectónicos de escala global como eventos colisionales, extensionales, subducción, subsidencia profunda de cuencas. En esta categoría de metamorfismo se incluyen los siguientes tipos de metamorfismo: orogénico, de enterramiento, de fondo oceánico.

Metamorfismo orogénico. Metamorfismo de extensión regional, asociado a la formación de cinturones orogénicos, pudiendo ocurrir en varias fases de la orogénesis en ambiente tanto compresional como extensional. Los efectos dinámico y termal se combinan de diferente manera.

Metamorfismo de enterramiento. Metamorfismo de extensión regional, que afecta rocas profundamente enterradas bajo pilas volcano-sedimentarias y no presenta relación con deformación o magmatismo. Las rocas resultantes están total o parcialmente recrystalizadas y por lo general

carecen de foliación. Las temperaturas alcanzadas varían entre muy bajas a medias, mientras que la relación P/T es baja a media.

Metamorfismo de fondo oceánico. Metamorfismo de extensión regional a local, relacionado con un abrupto aumento del gradiente geotermal cerca a centros de expansión oceánica. La recristalización a menudo es incompleta y ocurre a amplios rangos de temperatura, la cual aumenta con la profundidad. El metamorfismo se produce por la circulación de fluidos acuosos calientes. Este tipo de metamorfismo puede estar asociado con metasomatismo.

Metamorfismo local

Afecta áreas de extensión limitada, y el proceso metamórfico está restringido a una causa específica, por ejemplo, intrusión magmática, zona de falla, impacto de meteorito. En esta categoría, se incluyen los siguientes tipos de metamorfismo: hidrotermal, de contacto, de dislocación, de impacto, combustión, fulgurante, de lámina caliente.

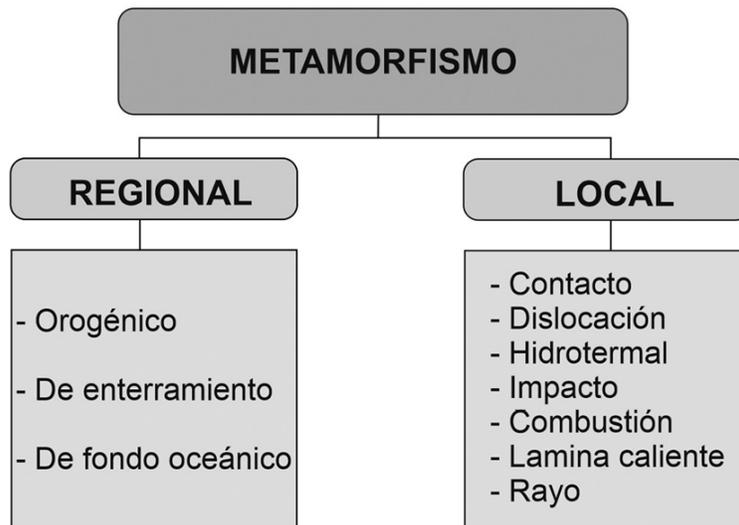


Figura 2. Clasificación de los procesos metamórficos de acuerdo con la extensión del proceso según la SCMR, 2007.

Metamorfismo de dislocación. Metamorfismo de extensión local, asociado a zonas de falla o cizalla. Las rocas sufren reducción del tamaño de grano y otros procesos deformativos.

Metamorfismo de impacto. Metamorfismo de extensión local, causado

por el impacto de un cuerpo planetario (proyectil) sobre la superficie del planeta (blanco). Los cambios de temperatura y presión extremas alcanzadas pueden generar fusión parcial y hasta vaporización en la roca impactada.

Metamorfismo de contacto. Metamorfismo de extensión local que afecta las rocas adyacentes a un cuerpo magmático. Es causado por la transferencia de calor del magma a la roca encajante. Ocurre bajo un amplio rango de temperaturas. Puede estar acompañado de esfuerzos desviatorios, relacionado con la dinámica de emplazamiento del magma. El **pirometamorfismo** es una variedad de metamorfismo de contacto que ocurre en enclaves o xenolitos a altas condiciones de temperatura.

Metamorfismo hidrotermal. Metamorfismo de extensión local, relacionado con fluidos acuosos calientes o gases que percolan por fracturas en la roca.

Metamorfismo de lámina caliente. Metamorfismo de extensión local, asociado al emplazamiento tectónico de cuerpos. Se genera un gradiente termal invertido y abrupto.

Metamorfismo de combustión. Metamorfismo de extensión local, relacionado con la combustión espontánea de carbón u otra sustancia bituminosa.

Metamorfismo fulgurante o de rayo. Metamorfismo de extensión local, asociado a descargas de rayos en la superficie del planeta.

Factores o causas del metamorfismo

El metamorfismo es un mecanismo que tienen las rocas para ajustarse a las nuevas condiciones a las que fueron sometidas. Estas nuevas condiciones están relacionadas con transporte o desplazamientos tectónicos a niveles más profundos de la corteza (subsistencia, enterramiento, subducción) o al efecto *in situ* de fuerzas externas (presiones de choque por impacto de meteoritos, efecto termal producido por magmas ascendentes, etc.). De esta manera, las causas o factores que producen el metamorfismo pueden ser de naturaleza física o química cuando las rocas interactúan con fluidos y ocurren reacciones químicas (Figura 3).

Las causas de naturaleza física corresponden a la temperatura y la presión. Esta última puede ser litostática, dirigida o fluidal. Ahora bien, estas causas del metamorfismo no se presentan o actúan de igual manera en cada uno de los tipos de metamorfismo, mencionados en el capítulo 1. La intensidad y combinación de estos factores dependen del ambiente geodinámico donde ocurrió el metamorfismo. Por ejemplo, durante el metamorfismo regional actúan con diferente intensidad la temperatura, presión litostática y los fluidos. El metamorfismo de contacto tiene como causa principal la temperatura, siendo la presión litostática poco variable.

En síntesis, variación en la temperatura, presión y fluidos generan cambios en volúmenes de rocas en la corteza y manto superior en fuerte dependencia de procesos geológicos a gran escala y también asociados a la dinámica interna de la Tierra.

Temperatura

La temperatura (T) actúa como catalizador de las reacciones metamórficas y como un mecanismo muy efectivo de los procesos de blastesis o recristalización de las rocas metamórficas.

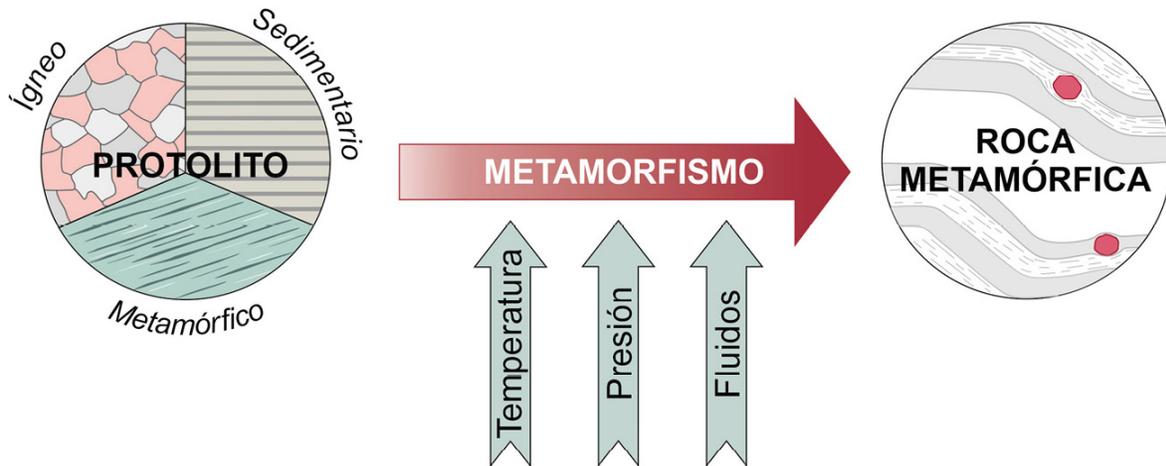


Figura 3. Factores o causas del metamorfismo.

La temperatura como factor del metamorfismo tiene tres orígenes principales:

- 1) Flujo de calor de las zonas más internas de la Tierra.
- 2) Desintegración radioactiva de elementos.
- 3) Transporte tectónico de bloques.

Durante los procesos metamórficos las variaciones en la temperatura son momentos claves para modificar el estado inicial de las rocas. Estos cambios en la temperatura están condicionados por la transferencia de calor o flujo térmico. Cuerpos calientes transfieren su calor a cuerpos más fríos. Este momento es descrito por la ley de Fourier:

$$J = -k \frac{dT}{dZ}$$

J – flujo térmico; K – conductividad térmica, dT/dZ – gradiente de temperatura.

Esta ley establece que el flujo de transferencia de calor por conducción es proporcional y de sentido contrario al gradiente de temperatura en esa dirección. Esta ecuación describe la conducción de calor en sistemas con

pequeñas diferencias de temperatura como es el caso de los procesos geológicos.

La ley de Fourier describe la transferencia de calor desde zonas de mayor temperatura hacia otras de menor. Esto tiene mucha relación con los procesos geológicos a gran escala, en los cuales se esperaría un transporte de calor desde las zonas internas y calientes de la Tierra hasta las zonas frías que corresponden a las capas externas de la corteza. Por este motivo, existe un continuo flujo térmico desde el núcleo-manto hacia la superficie de la Tierra (Figura 4).

El flujo térmico es medido en miliWatio por metro cuadrado (mW/m^2). Mediciones en la superficie de la Tierra arrojan valores entre 30 y 120 mW/m^2 (Bucher y Grapes, 2011).

El flujo térmico puede tener tres fuentes diferentes: 1) calor por conducción desde el interior de la Tierra; 2) transporte convectivo de calor desde el manto; 3) transporte de calor por desintegración radioactiva de elementos.

Según Bucher and Grapes (2011), durante el transporte o transferencia del flujo térmico a un determinado volumen de roca al interior de la Tierra se pueden presentar las siguientes situaciones:

- 1) El flujo térmico dentro del volumen cortical es igual al flujo térmico externo. En este caso la temperatura del volumen cortical permanecería constante. Se conoce como geoterma constante o estacionaria.
- 2) El flujo térmico dentro del volumen cortical es mayor al flujo térmico externo. Este exceso de calor en el volumen cortical será usado para incrementar la temperatura de este y para producir reacciones endotérmicas en las rocas.

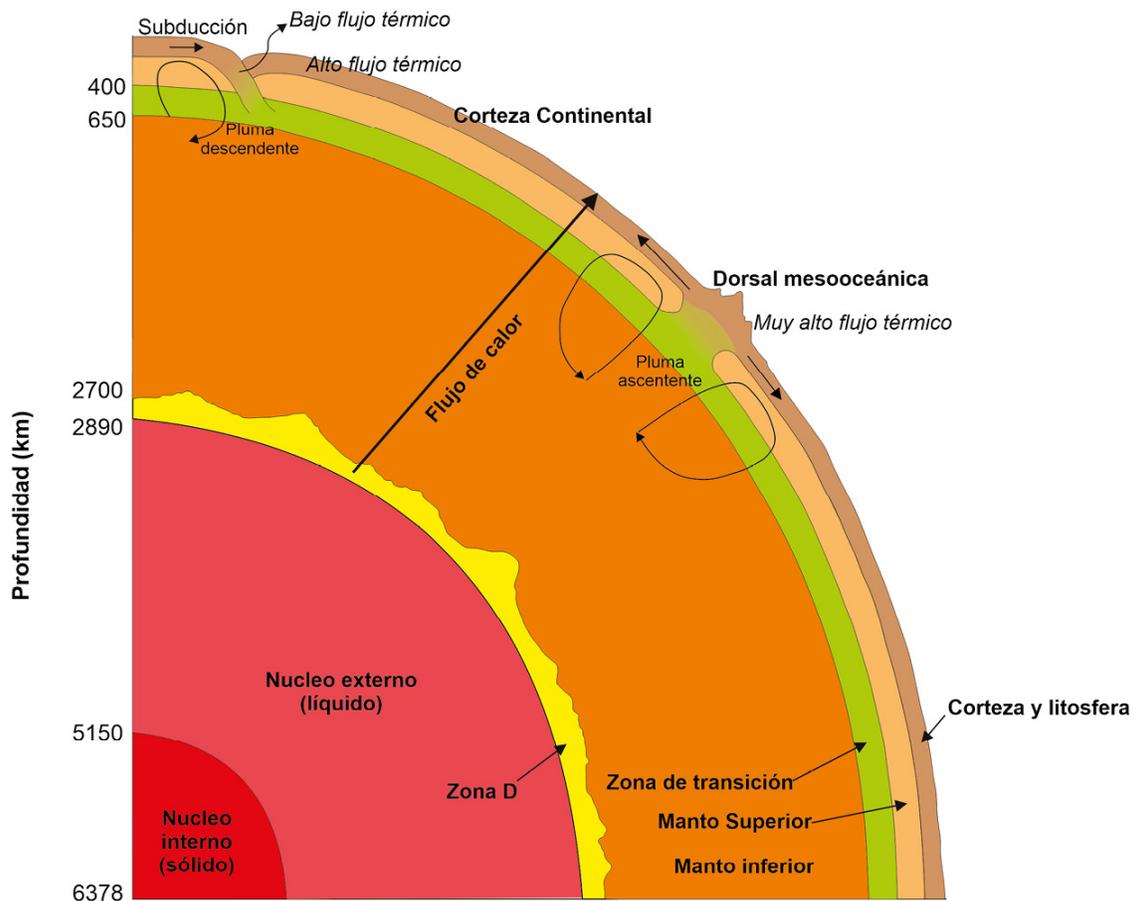


Figura 4. Estructura interna de la Tierra, destacando la dirección del flujo térmico y las variaciones de este en diferentes ambientes geológicos.

3) El flujo térmico dentro del volumen cortical es menor al flujo térmico externo. En este caso, la pérdida de calor en el volumen cortical resulta en un descenso de la temperatura, produciéndose reacciones exotérmicas que generan calor extra que evita el rápido enfriamiento.

De acuerdo con lo anterior, el flujo de calor puede ser diferente al mismo nivel de profundidad, como lo muestran diferentes estudios. La temperatura y profundidad se representan como curvas denominadas *geotermas*. El gradiente geotermal (dT/dZ) es la inclinación de la geoterma a una profundidad dada en la corteza o el manto, es decir, cambios de la temperatura en dependencia de la profundidad. En la Figura 5a se observa la distribución anómala de las geotermas en zonas de expansión oceánica (dorsales meso-oceánicas), en las cuales los altos flujos

térmicos hacen que estas isothermas se comporten de forma anómala produciendo penachos térmicos hacia el centro de las dorsales y suavizándose hacia las partes periféricas menos calientes.

La temperatura en rocas de la corteza y el manto puede presentar variaciones. Esta adición o sustracción de calor está relacionada con un conjunto de procesos geológicos. A grandes profundidades la temperatura puede ser modificada en dependencia de la tectónica de placas (posición de las placas, movimientos convectivos del manto, etc.). Procesos de colisión continental precedidos de subducción generan gradientes térmicos anómalos (Figura 5b).

Emplazamientos de magmas a diferente nivel cortical crean también incrementos de la temperatura. Estas formas anómalas de cambios en la temperatura a profundidad y con valores cambiantes en el tiempo se denominan *geotermas transitorias*.

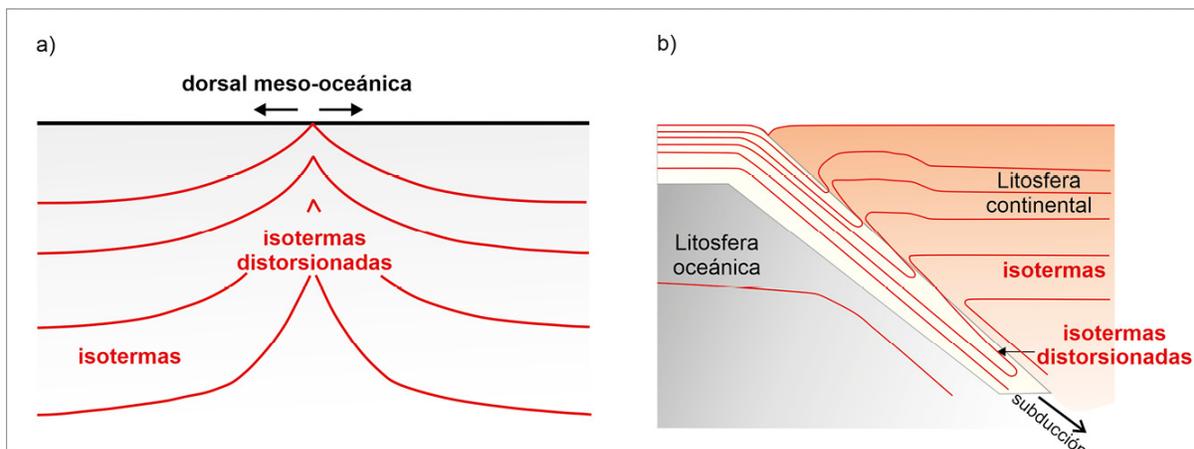


Figura 5. Forma y distribución de las isothermas. a) en dorsales meso-oceánicas y b) en zonas de subducción y ambientes continentales.

En la Figura 5b se presenta la distribución de las geotermas en una zona de subducción, evidenciando cambios importantes en la temperatura en dependencia de la profundidad. Se observa cómo en el canal de subducción las geotermas se distorsionan, e iguales valores de temperatura son alcanzadas a diferentes profundidades. La subducción de corteza más fría en el canal de subducción hace que, para alcanzar altas temperaturas, la subducción debe ser a profundidades considerables.

Presión

La presión que actúa durante el metamorfismo es de tres tipos: litostática, dirigida o fluidal.

Presión litostática. Un volumen de roca situado a una profundidad Z es afectado por la carga que ejercen las rocas suprayacentes. Esta relación es expresada como:

$$P = g\rho z \text{ (1)}$$

P – presión; g – aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$); ρ – densidad de las rocas. La densidad de las rocas corticales es en promedio $2,7 \text{ g/cm}^3$.

El valor de la presión en la superficie de la Tierra se considera $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ kg/m.s}^2$

La unidad de medida de la presión litostática para procesos geológicos ha sido el bar, aunque en los últimos años se está usando el pascal (Pa), unidad del sistema internacional.

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}; 1 \text{ Kbar} = 10^8 \text{ Pa} = 0,1 \text{ Gpa (gigapascuales)}.$$

De acuerdo con la ecuación (1), una roca situada a 10 km de profundidad con una densidad de $2,8 \text{ g/cm}^3$ experimentará una presión litostática de 2,75 Kbar o 0,27 Gpa.

Por lo anterior, la presión litostática varía con la profundidad y actúa de forma similar en todo el volumen de roca afectado, es decir, es isotrópica (Figura 6a). Los efectos de esta presión durante el metamorfismo se relacionan con compactación, disminución de volumen y expulsión de fases fluidas, lo que favorece la recristalización de los minerales.

Presión dirigida. Los esfuerzos desviatorios son la característica principal de este tipo de presión. Esto quiere decir que los esfuerzos a los que están sometidos las rocas son diferentes en magnitud y dirección. Por esta razón, un volumen de roca sometido a presión dirigida experimentará más deformación en una dirección más que en otra, dependiendo de la intensidad o magnitud del esfuerzo (Figura 6b). La presión dirigida, por tanto, es anisotrópica, y está muy relacionada con fuerzas tectónicas y en estrecha dependencia de la profundidad a la cual ocurren, lo que a su vez está relacionado con la temperatura y presión litostática operantes a dicha