

Reconocimiento de rocas metamórficas con la ayuda del microscopio petrográfico

Identifying metamorphic rocks with the help of the petrographic microscope

GEMMA ALÍAS LÓPEZ, MERITXELL AULINAS JUNCÀ, CARMEN M. AGUILAR GIL Y
HELENA ALBERT MÍNGUEZ

Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada Facultat de Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona, Martí i Franqués s/n, 08028 Barcelona. E-mail: galias@ub.edu,

Resumen El metamorfismo es un proceso que tiene lugar en la corteza terrestre y, más raramente, en el manto superior, que suele estar asociado a los límites de placas tectónicas y da lugar a la formación de rocas metamórficas. Este proceso se caracteriza por un conjunto de cambios en la textura y la mineralogía, en el estado sólido, que experimenta cualquier roca sometida a condiciones de presión y temperatura diferentes a las de su formación, excluyendo los procesos diagenéticos propios de rocas sedimentarias. La clasificación de las rocas metamórficas se lleva a cabo atendiendo a los minerales y texturas que presentan. Estas características a menudo requieren ser identificadas con la ayuda del microscopio petrográfico. En las aulas de Secundaria y Bachillerato siempre es un reto para el profesorado la enseñanza de estas rocas. Por ello, en este trabajo se describen los aspectos más relevantes acerca del metamorfismo y se propone una actividad didáctica que incluye fichas de apoyo a la identificación del tipo de metamorfismo y los grupos composicionales, así como 13 descripciones de rocas metamórficas en lámina delgada.

Palabras clave: Microscopio, minerales, petrografía, recurso didáctico, rocas metamórficas, texturas.

Abstract *Metamorphism is a process that takes place predominantly in the crust and the upper mantle, generally associated with the limits of tectonic plates, and that gives rise to the formation of metamorphic rocks. This process is characterized by a set of changes in the texture and mineralogy, in the solid state, that any rock undergoes under different pressure and temperature conditions of its formation, excluding the diagenetic processes typical of sedimentary rocks. The classification of metamorphic rocks is quite complex since they are made up of a great variety of minerals and textures that often require identification with the help of the petrographic microscope. In Secondary and Baccalaureate classrooms it is always a challenge for teachers to teach these rocks. For this reason, in this work we describe the most relevant aspects of metamorphism and propose a didactic activity, which includes informative cards to support the identification of the type of metamorphism and compositional groups, and 13 metamorphic rocks described in thin section.*

Keywords: *Metamorphic rocks, microscope, minerals, petrography, teaching resources, textures.*

INTRODUCCIÓN

Las rocas metamórficas junto a las rocas ígneas constituyen más del 95% del volumen de la corteza terrestre, si bien en superficie sólo están expuestas a lo largo de los cinturones orogénicos y en las áreas cratónicas de la Tierra, ocupando una extensión mucho menor. La importancia de su estudio yace en que constituyen una de las claves para la reconstrucción de la historia de la Tierra, además de su interés económico como rocas ornamentales o de

construcción y su valor en la ingeniería civil. En la Península Ibérica afloran en el Macizo Ibérico, en los mantos inferiores de los Pirineos, en la Cadena Costera Catalana, en la Cordillera Ibérica o en las zonas internas de la Cordillera Bética. Son conocidas las explotaciones de mármoles en Almería, las pizarras de León, o las cuarcitas y gneises en Galicia, entre otras. En la obra civil cabe destacar la importancia de una buena caracterización de estas rocas, ya que algunas propiedades físicas pueden suponer un problema para la construcción. Por todo ello, se con-

sidera el estudio de las rocas metamórficas de tanta importancia, sin embargo, el hecho de que estas rocas presenten un amplio abanico de asociaciones minerales y de composiciones químicas diferentes, así como una gran diversidad de texturas, hace que a menudo se las relegue en su estudio a favor de las rocas ígneas y sedimentarias. Además, tenemos que tener en cuenta que resulta imposible reproducir en el aula mediante experimentos los mecanismos de formación de las rocas metamórficas; a lo sumo, en el laboratorio se pueden simular cambios físicos sujetos al endurecimiento por impacto de calor o deformación por acción de presión dirigida. Todo ello aleja a los docentes de su enseñanza.

En este trabajo se describen los aspectos más relevantes acerca del metamorfismo, incluyendo los procesos que ocurren así como los cambios texturales y mineralógicos que se producen en las rocas. Además, se propone una manera de aproximar el aprendizaje de las rocas metamórficas y los procesos que las han formado a través de preguntas conceptuales y una serie de actividades basadas en dos parámetros que permiten la clasificación de las rocas: la textura y los minerales. Los minerales reflejan la composición química de la roca y las condiciones de presión y / o temperatura a la que se han formado; las texturas son indicativas de la fuente de calor, de los esfuerzos que han experimentado o del orden de crecimiento de los minerales en la roca. Estos dos parámetros se pueden reconocer a simple vista, sin embargo, a menudo el tamaño de los cristales o la identificación precisa de una especie mineral no puede realizarse sino es bajo la observación del microscopio petrográfico. Por ello, este trabajo se acompaña de microfotografías para la realización de las actividades que permitan al alumnado acceder a esa dimensión gráfica tan fascinante a la vez que reveladora. La propuesta se basa en la experiencia recogida a lo largo de más de treinta años en la enseñanza universitaria en el campo de la petrología metamórfica (Liesa y Alías, 1997; Mangado y Alías, 2019; Alías *et al.*, 2020) y en los diferentes seminarios impartidos a profesorado de Secundaria y Bachillerato. Todo el material gráfico generado en este artículo está disponible en el Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona, a través del enlace <https://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/180088>.

EL RECONOCIMIENTO DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

La petrología es aquella rama de la geología que estudia las rocas, tanto desde un punto de vista descriptivo de sus componentes y su distribución en el espacio (petrografía) como su formación (petrogénesis).

¿DÓNDE, CÓMO Y POR QUÉ SE FORMAN LAS ROCAS METAMÓRFICAS?

El metamorfismo es un proceso endógeno que tiene lugar en el interior de la corteza y el manto superior. En el interior de la Tierra existe una gran variedad de ambientes geológicos donde pueden tener lugar los procesos metamórficos. Cualquier

roca puede transformarse en una roca metamórfica si se somete a variaciones de presión (P) y/o de temperatura (T) que provoquen una serie de cambios mineralógicos que conduzcan a una reorganización de todos los componentes en el espacio, en el estado sólido.

Estas variaciones de las condiciones de presión y/o de temperatura tienen lugar, en la mayoría de las ocasiones, en los límites entre placas tectónicas. Se trata de áreas activas donde existen anomalías térmicas, como las zonas orogénicas, zonas con actividad magmática, o áreas con importantes movimientos verticales, como zonas de subducción (Fig. 1). Los cambios de P y T van acompañados, además, de la acción de un campo de esfuerzos tectónicos. En Crespo-Blanc (2018) se puede encontrar una amplia descripción de los procesos geológicos (metamorfismo, deformación, magmatismo) que tienen lugar en los orógenos de colisión.

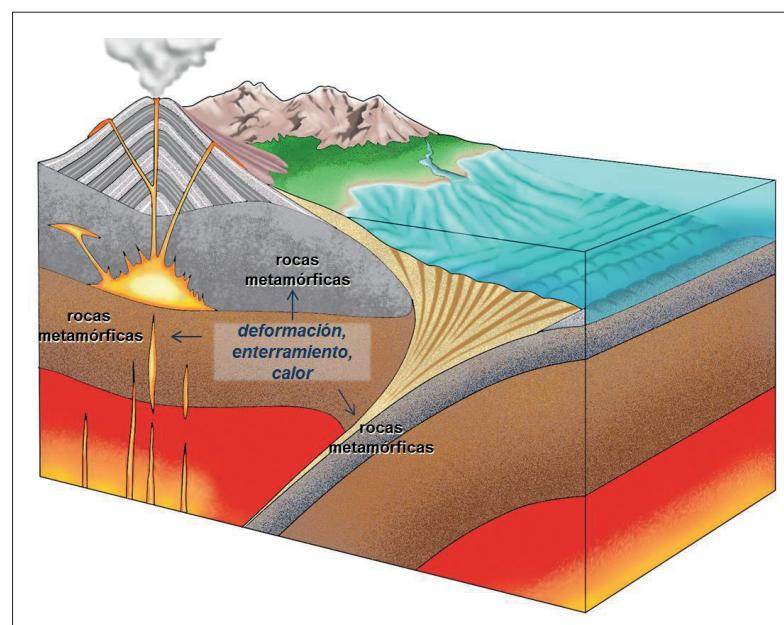
Aunque desligado de la tectónica de placas, también pueden causar metamorfismo el enterramiento en cuencas profundas, con el consiguiente calentamiento de las secuencias sedimentarias, o los impactos meteoríticos en la superficie de la Tierra, cuyo choque da lugar a minerales de P y T muy elevadas.

Los procesos tectónicos y erosivos permiten encontrar en superficie rocas que se han formado en el interior de la Tierra, como las rocas plutónicas y las rocas metamórficas, que suelen aflorar como parte del núcleo de cordilleras montañosas recientes o en zonas de escudos cratónicos.

¿POR QUÉ LAS ROCAS METAMÓRFICAS SE CONSERVAN “FRESCAS” EN SUPERFICIE?

Si los minerales de las rocas metamórficas se forman en condiciones de presión y de temperatura superiores a las que rigen en la superficie de la Tierra, ¿cómo es posible que no se encuentren alterados al aflorar en superficie? Sería lógico pensar que cuando estas rocas son desenterradas, las asociaciones de minerales de-

Fig. 1. Localización de las rocas metamórficas en la corteza terrestre en un límite de placa convergente.



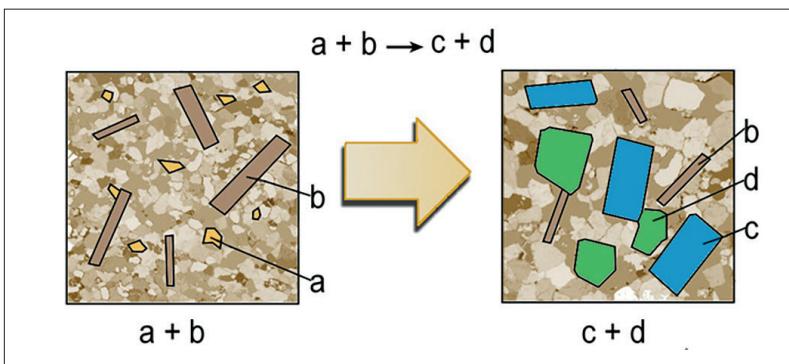


Fig. 2. Ilustración de los cambios texturales producidos por las reacciones metamórficas. A unas determinadas condiciones de P y T (a) y (b) son dos minerales estables, cuando se produce la reacción se forman otros de nuevos (c) y (d). La reacción se consuma en el momento en que una de las fases reactantes se agota (a); mientras que el mineral en exceso (b) merma en dimensión y proporción en la roca. Los minerales que no participan en la reacción aumentan de tamaño por el incremento de la T.

berían adaptarse a las condiciones de presión atmosférica y bajas temperaturas; sin embargo, no lo hacen, se encuentran en un *estado metaestable*. Ello se debe a que la falta de fluidos y de tiempo no ha permitido invertir el sentido de las reacciones y transformar las estructuras cristalinas de altas temperaturas y presiones a otras de menor temperatura y presión.

¿CUÁNDO SE CONSIDERA QUE UNA ROCA ES METAMÓRFICA?

Los rangos de presión y de temperatura a partir de los cuales empieza el metamorfismo no están establecidos de manera absoluta; definir los límites del metamorfismo es algo arbitrario. El criterio utilizado para definir si una roca es o no metamórfica viene indicado por la aparición de determinados minerales según cada grupo composicional de roca.

Aproximadamente, el límite térmico inferior, el que separa los procesos diagenéticos de los metamórficos, se sitúa alrededor de los 200°C en las rocas sedimentarias limosas o T inferiores para rocas ígneas de composición básica. El límite de T superior del metamorfismo coincide con el inicio de la fusión, siempre que las rocas se mantengan en general en estado sólido. La temperatura estimada para este límite va desde los 650 hasta los 1100°C y depende de la composición de la roca, la presión o la cantidad de agua presente en el sistema.

Por otro lado, la presión más baja a la que puede formarse una roca metamórfica viene determinada por la profundidad a la que el calor emitido por un cuerpo ígneo puede inducir al metamorfismo de la roca encajante. Esto significa que la P puede ser desde cero o casi cero, si tenemos en cuenta que hay intrusiones próximas a la superficie de la Tierra o que la extrusión de una colada de lava puede metamorfizar el sustrato sobre el cual reposa. Las presiones máximas alcanzadas por las rocas metamórficas llegan a los 3 – 6 GPa (que equivalen a unos 100 – 200 km de profundidad); son presiones extraordinarias, propias de cordilleras de colisión.

En petrología, existen diferentes formas de definir la intensidad del metamorfismo, es decir, las condiciones de P y T a las que se ha formado una roca (grado, facies, gradiente). El concepto de facies metamórfica es muy útil porque concreta para una determinada asociación de minerales un rango específico de P y T (ver fig. 7 de Crespo-Blanc, 2018 tomada de García-Casco, 2008).

¿POR QUÉ CAMBIAN LA TEXTURA Y MINERALOGÍA DE UNA ROCA?

Se sabe, y se ha demostrado experimentalmente, que la asociación de minerales que constituye cualquier roca es estable en un rango de presiones y de temperatura determinados. Cuando se sobrepasa este rango dicha asociación deja de ser estable y necesita adaptarse a las nuevas condiciones formando nuevos minerales. Esta transformación tiene lugar mediante una *reacción metamórfica*. Los cristales reorganizan su estructura cristalina sin transferencia de materia (polimorfos) o por reacciones de uno o más minerales que se encuentran en desequilibrio.

La formación de nuevos minerales o la recristalización de minerales preexistentes conllevan una nueva configuración espacial (Fig. 2); si, además, consideramos el hecho de que muchas rocas metamórficas están sometidas a esfuerzos tectónicos, la aplicación de una presión dirigida controla también la orientación de los componentes en el espacio. Se entiende por recristalización el reemplazamiento de un mineral por otro de la misma composición, con formas cristalinas de tamaños superiores y mejor desarrollados.

Así pues, tanto las asociaciones de minerales como las texturas de las rocas metamórficas son caracteres propios de las mismas.

TIPOS DE METAMORFISMO

Los tipos de metamorfismo se establecen en base al contexto geológico en el que se generan, ya que ese contexto condiciona qué proceso va a dar lugar al metamorfismo. En la Tabla I se encuentran las áreas donde pueden producirse procesos metamórficos en la Tierra.

LOCALIZACIÓN	METAMORFISMO	PRODUCIDO POR
Alrededor de cuerpos magmáticos	De contacto (o térmico)	La disipación del calor del cuerpo ígneo hacia la roca de caja
Áreas orogénicas y zonas de subducción	Regional (o dinamotérico)	La variación de la P y T asociadas a la tectónica
Fondo oceánico	Hidrotermal	La circulación de fluidos calientes
Zonas de cizalla	Dinámico	La intensa deformación

Tabla I. Tipos de metamorfismo.

LOS MINERALES DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

Las transformaciones metamórficas se dan en el estado sólido y no comportan ninguna variación importante en lo que respecta a la composición química global de la roca, por lo que se dice que el metamorfismo sucede en un sistema cerrado y es un proceso isoquímico. Por este motivo, los minerales de las rocas metamórficas, aun siendo diferentes de

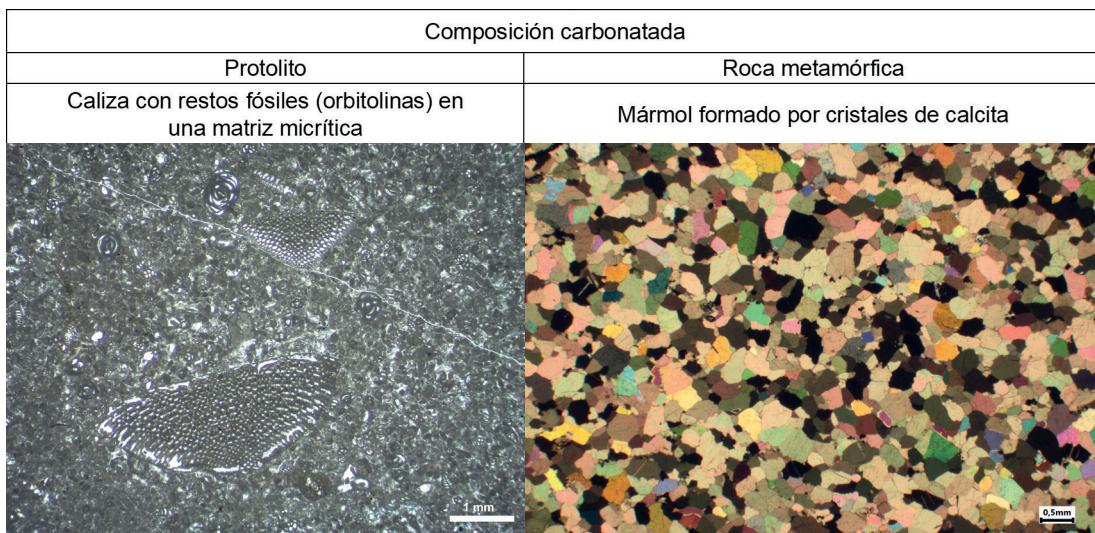


Fig. 3. Roca sedimentaria (de Alías et al., 2020) y roca metamórfica de composición carbonatada.

la roca original de la cual proceden (protolito), están compuestos por los mismos elementos químicos.

Los minerales tienen una composición química definida, por eso la asociación de minerales y el porcentaje en el que se encuentran en una roca refleja su composición química. Por este motivo, las rocas metamórficas se agrupan en grupos compositionales, que hacen referencia a la composición química del protolito (Fig. 3 y 4).

Dado que las rocas metamórficas provienen de otras rocas ígneas o sedimentarias, las composiciones químicas son muy variadas, esto hace que la lista de minerales metamórficos sea muy amplia. A pesar de esta variedad, los minerales más comunes son: cuarzo, feldespatos, biotita, moscovita, clorita, anfíboles, piroxenos, olivinos, silicatos de aluminio (ej. andalucita, sillimanita, cianita, cordierita, estaurolita, granate), silicatos de calcio o magnesio (ej. talco, wollastonita, grupo de las epidotas), calcita, entre otros.

Existen muchos manuales que tratan con el reconocimiento de los minerales a simple vista y con microscopio (Abad y Velilla, 2018; Melgarejo, 1997; Mata Perelló, 2008; Gil-Crespo, 2009), así como atlas específicos o guías para la identificación de las rocas metamórficas (Alías et al., 2008; Yardley et al., 1997). Las propiedades ópticas utilizadas en el reconocimiento de minerales, a simple vista, incluyen: el

habito, el color, la exfoliación, el brillo, la dureza, la presencia de maclas, entre otros. De todos ellos, el color es un elemento muy significativo ya que controlará el color resultante de la roca. Por lo tanto, atribuir uno o varios colores a la roca servirá, de manera aproximada, para asignar un grupo compositional de las rocas metamórficas (Tabla II).

COLOR	MINERALES
Amarillo	Epidota
Azul	Glaucofana, Cianita
Blanco	Cuarzo, Calcita, Ortosa, Plagioclasa, Sillimanita, Talco, Tremolita, Wollastonita
Marrón, ocre	Biotita, Flogopita
Naranja	Estaurolita
Oscuro	Cordierita, Andalucita
Plateado	Moscovita
Rojo	Granate
Verde	Clorita, Serpentina, Hornblendita, Actinolita, Onfacita, Jadeíta, Diópsido, Olivino, Cloritoide

Tabla II. Asignación del color a minerales metamórficos a simple vista.



Fig. 4. Roca ígnea (de Alías et al., 2020) y roca metamórfica de composición cuarzo-feldespática.

Tabla III. Principales tipos de composiciones globales de roca

PROTOLITO	GRUPO COMPOSICIONAL	MINERALOGÍA METAMÓRFICA
Lutita	Pelítica	Filosilicatos: biotita, moscovita, clorita Silicatos de aluminio: cordierita, andalucita, cianita, sillimanita, granate, estaurolita, cloritoide Cuarzo Feldespatos: plagioclasa, ortosa
Arenita rica en cuarzo	Cuarcítica	Cuarzo Feldespatos: plagioclasa, ortosa Filosilicatos: biotita, moscovita, clorita
Caliza Dolomía	Carbonatada	Calcita, dolomita Cuarzo Silicatos de calcio – magnesio: talco, tremolita, diópsido, olivino, wollastonita Otros: granate, epidota, flogopita
Caliza impura Dolomía impura Marga	Calcosilicatada	Silicatos de calcio – magnesio: talco, tremolita, diópsido, olivino, wollastonita Calcita Cuarzo Otros: granate, epidota, flogopita
Granito Arcosa	Cuarzo-feldespática	Cuarzo Feldespato: plagioclasa, ortosa Silicatos de aluminio: andalucita, sillimanita, cianita, granate
Basalto Gárbol	Básica	Anfíbol verde: hornblenda, actinolita Piroxeno verde: onfacita, jadeíta Feldespato: plagioclasa Epidota Granate Cuarzo
Peridotita	Ultramáfica	Talco Serpentina

En la Tabla III se recogen los minerales metamórficos de los principales tipos compositivos de roca. Es importante retener de esta lista que algunos minerales son exclusivos o mayoritarios en determinados tipos de rocas. Y como se explicará más adelante, no todos los minerales tienen que estar necesariamente presentes a la vez en la misma roca, ya que muchos de ellos son estables en determinados rangos de presión y temperatura.

EL SIGNIFICADO DE LAS TEXTURAS METAMÓRFICAS

En geología, se entiende por textura la descripción de la forma y tamaño de los cristales, así como las relaciones espaciales entre ellos (cómo están distribuidos u organizados). Al igual que en las rocas ígneas, en las rocas metamórficas la organización en el espacio de los minerales y las características particulares de estos nos informan sobre el tipo de procesos que han operado durante su formación. En muchos manuales de petrología metamórfica se establece una diferencia en el uso de la palabra textura (forma, tamaño) y microestructura (distribución, organización); en este trabajo y para un nivel del aula preuniversitaria se usará, de modo general, el término textura.

Los cristales son el único componente de las rocas metamórficas, no existen porosidad, vesículas, fósiles o vidrio. Todos estos componentes han desaparecido por compactación o se han transformado en otros minerales.

No todas las rocas responden igual a los cambios de presión y de temperatura, y por lo tanto no todas las texturas de las rocas metamórficas son iguales. Texturalmente, será muy diferente una roca formada exclusivamente por cuarzo que una roca formada por micas.

Los factores que condicionan la gran diversidad de texturas son:

- el tipo de metamorfismo (térmico, dinamotérmico, dinámico),
- la morfología de los cristales (prismáticos, tabulares, redondeados),
- la textura original del protolito,
- el comportamiento de los minerales ante la deformación.

Supongamos una roca en la que cristalizan minerales inequidimensionales (prismáticos, tabulares) durante un metamorfismo esencialmente térmico. La cristalización se realizará completamente al azar, sin orientación preferente, (*textura decusada*) dando lugar a una roca completamente isotropa, de aspecto masivo (Fig. 5a; Fig. 6a).

Si, por el contrario, el metamorfismo es dinamotérmico la cristalización será preferentemente a lo largo de planos o líneas provocando en la roca una clara anisotropía planar (*textura foliada*) o lineal (*textura lineal*) (Fig. 5c, b; Fig. 6b, c).

Si la roca está formada mayoritariamente por minerales equidimensionales, tanto si el metamorfismo es térmico como dinamotérmico, este tipo de minerales no puede cristalizar según ninguna

orientación preferente, la roca también será isótropa y presentará *textura granoblástica* (Fig. 5d; Fig. 6d).

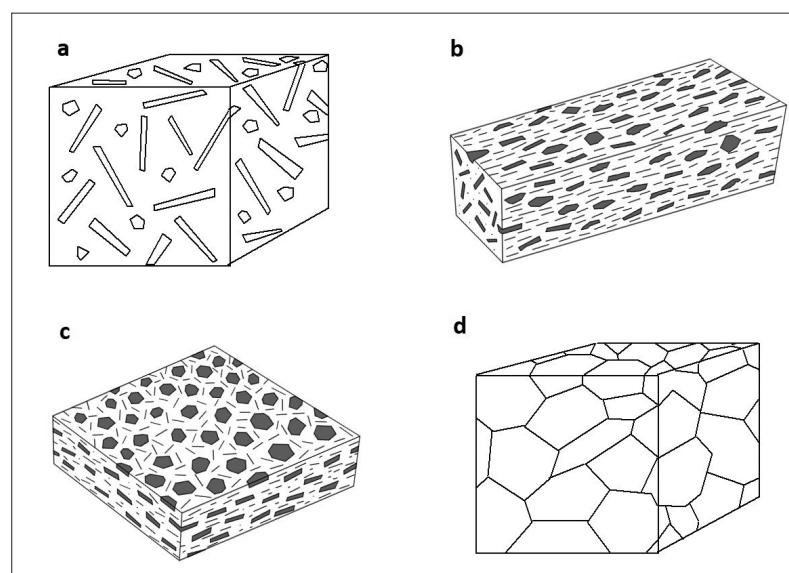
Si la intensidad del metamorfismo no es muy elevada, es posible que se conserven rasgos propios de la roca original; por ejemplo, la laminación de una roca sedimentaria puede conservarse durante el metamorfismo.

Solo en el caso que la intensidad de los esfuerzos tectónicos sea muy elevada, entonces los cristales no soportarán la presión y se deformarán.

Las formas más o menos euhedrales de los cristales, es decir con caras bien formadas, dependen de la velocidad de crecimiento, la facilidad de nucleación, la presencia de fluidos o la presión tectónica, entre otros factores.

Ante la aplicación de esfuerzos tectónicos durante un proceso metamórfico cada tipo de roca responde de manera diferente, ya que los minerales tienen diferentes comportamientos frente a la deformación. El resultado son texturas completamente diferentes; por ejemplo, una roca rica en feldespatos tiende a fracturarse, mientras que una roca rica en calcita se deforma dúctilmente.

En las rocas de composición pelítica es frecuen-



te la formación de cristales con dimensiones de 5 a 10 veces mayores que el resto de minerales que los rodean, y que se denominan porfidoblastos (*textura porfidoblástica*; Fig. 6e). Suelen ser muy idioblásti-

Fig. 5. Esquema de las principales texturas de las rocas metamórficas.
a) *textura decusada*,
b) *textura lineal*,
c) *textura foliada*,
d) *textura granoblástica*.

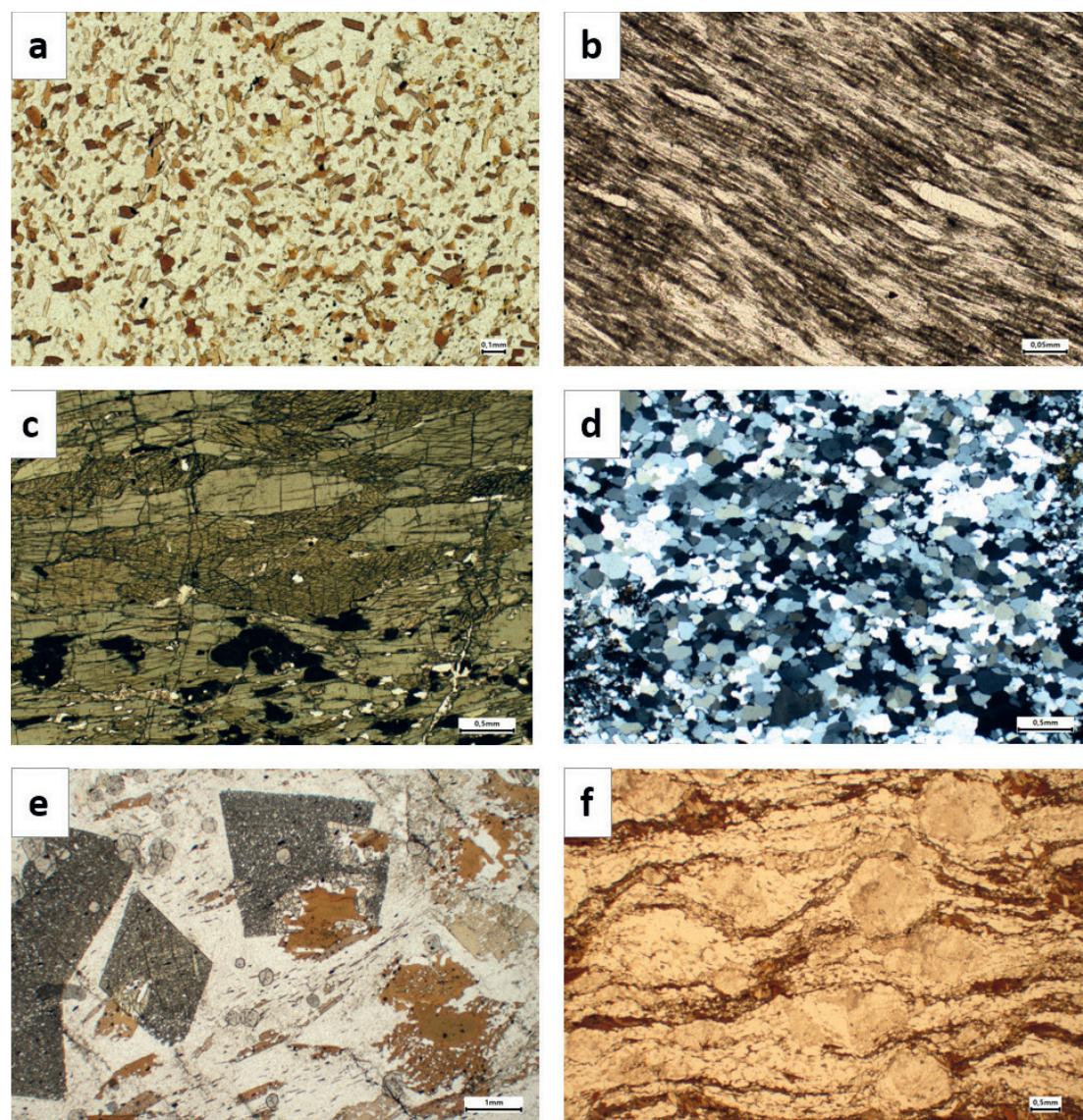


Fig. 6. Principales texturas de las rocas metamórficas vistas al microscopio. a) *textura decusada* (NP), b) *textura foliada* (NP), c) *textura lineal* (NP), d) *textura granoblástica* (NX), e) *textura porfidoblástica*, f) *textura gneísica* (NP). NP: luz polarizada plana. NX: luz polarizada cruzada.

ROCA	GRUPO COMPOSICIONAL	MINERAL ESENCIAL
Cuarcita	cuarcítica	Cuarzo
Mármol	carbonatada	Calcita
Anfibolita	básica	Anfíbol verde (hornblenda) + plagioclasa
Eclogita	básica	Piroxeno sódico (onfacita) + granate
Esquisto azul	básica	Anfíbol azul (glaucofana) + plagioclasa
Serpentinita	ultramáfica	Serpentina
Talcoesquisto	ultramáfica	Talco

Tabla IV. Principales rocas monominerales o con asociaciones simples.

cos y a veces presentan numerosas inclusiones en su interior. En las rocas formadas por metamorfismo de contacto, la formación de porfidoblastos es muy numerosa y se caracterizan por no superar los 2 o 3 mm de diámetro, hecho que confiere a la roca un aspecto muy particular, que recibe el nombre de *textura moteada*.

Muchas rocas metamórficas suelen mostrar una laminación (de orden milimétrico) o bandeados (de orden centimétrico) debido a cambios en la composición o en la textura de la roca, que bien se ha podido formar por una redistribución de los minerales durante el metamorfismo o bien por una herencia de la roca predecesora.

De la combinación de algunas de estas texturas puede resultar un nuevo término que englobe a todas ellas, como es el caso de la *textura gneísica* (Fig. 6f). Esta ha de cumplir que la roca sea muy heterogranular, según la presencia de grandes cristales (porfidoblastos) rodeados de una matriz laminada, con bandas con textura granoblástica y bandas con textura foliada. A diferencia de los porfidoblastos, que son cristales que se forman durante el proceso

Tabla V. Clasificación de las rocas pelíticas.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional	
Pizarra	Roca mate, de tamaño de grano < 0,1 mm, con foliación marcada (clivaje)
Filita	Roca satinada, de tamaño de grano entre 0,1 – 0,25 mm (excluyendo porfidoblastos), con foliación marcada (clivaje)
Esquisto	Roca de tamaño de grano visible, con foliación marcada (esquistosidad), que puede o no presentar porfidoblastos
Gneis pelítico	Roca de grano grueso, inequigranular, de aspecto heterogéneo con foliación poco desarrollada
De contacto	
Corneana pelítica o corneana moteada	Roca dura, de grano fino, constituida por cristales sin orientación preferente, que puede o no presentar moteado. En algunos textos, esta roca también se denomina cornubianita, aunque es un término en desuso
Regional + contacto	
Pizarra moteada Filita moteada Esquisto moteado	Rocas de metamorfismo regional con presencia de "motas" formadas durante un metamorfismo de contacto

metamórfico, los porfidoblastos son minerales que ya existían en la roca antes de metamorfizarse.

CLASIFICACIÓN DE LAS ROCAS METAMÓRFICAS

Hay varias maneras de nombrar las rocas metamórficas, según se tenga en cuenta la naturaleza del protolito, el grupo composicional, la mineralogía, el tipo de metamorfismo, las condiciones de P y T o diversos de estos parámetros a la vez. En cualquier caso, ninguna de estas clasificaciones se excluye entre ellas, sino que son diferentes formas de nombrar una roca metamórfica de una manera más o menos precisa.

Nomenclatura según la naturaleza del protolito o grupo composicional

Esta clasificación utiliza el prefijo *meta-* aplicado a la roca sedimentaria o ígnea de la que deriva. Esta clasificación puede aplicarse si se reconocen claramente los caracteres texturales originales cuando la intensidad del metamorfismo ha sido muy débil. Ahora bien, si el metamorfismo ha borrado cualquier indicio de la roca predecesora entonces se ha de recurrir a la identificación del grupo composicional a partir de la mineralogía (Tabla III).

Ejemplos: metaconglomerado, metabasita

Nomenclatura de rocas monominerales o con asociaciones minerales simples

Se consideran rocas monominerales aquellas que están constituidas esencialmente, más del 75%, por un único mineral. Estas rocas tienen nombres muy familiares como el mármol o la cuarcita. Además, hay otras rocas metamórficas formadas dominanteamente por parejas de minerales que también hacen fácil su clasificación, como las anfibolitas (Tabla IV).

Nomenclatura según el tipo de metamorfismo

Algunos tipos de metamorfismos, como el de contacto y el dinámico, dan lugar a nombres de rocas con unas características texturales muy identificativas. Así, las rocas de metamorfismo de contacto reciben, en sentido amplio, el nombre de *corneanas*; este nombre deriva de cuerno y sugiere que estas rocas son duras y macizas. Las rocas de metamorfismo dinámico se denominan *cataclasitas* o *milonitas*, según se trate de rocas fracturadas o deformadas dúctilmente, respectivamente.

Nomenclatura según el grupo composicional y el tipo de metamorfismo

Esta es la clasificación más completa que se aplica a todas las rocas. Para emplearla correctamente, hay que conocer la mineralogía de la roca, para atribuirle un grupo composicional, y su textura, para conocer el tipo de metamorfismo. En este trabajo se han obviado algunas rocas poco comunes. En las tablas siguientes se recogen las clasificaciones simplificadas y las descripciones de las rocas pelíticas (Tabla V), rocas cuarcíticas (Tabla VI), rocas cuarzo-feldespáticas (Tabla VII), rocas carbonatadas y calcosilicatadas (Tabla VIII), rocas básicas (Tabla IX) y rocas ultramáficas (Tabla X).

RECURSOS DIDÁCTICOS

Las actividades están diseñadas para que alumnos/as de Secundaria y Bachillerato descubran las maneras en que se forman las rocas metamórficas según los efectos de la presión, temperatura y tipo de metamorfismo y, en particular, aprender a reconocer los minerales y las texturas en muestra de mano y al microscopio. El microscopio petrográfico es un instrumento de trabajo imprescindible para una buena descripción e identificación de las rocas en general. Aunque muchos de los centros educativos no tienen un acceso a este tipo de herramienta, es interesante que el alumnado pueda ver por primera vez alguna microfotografía con el fin de acercar esta dimensión y entender la cantidad de información suplementaria que proporciona este recurso. Por eso, en estas actividades se suministran microfotografías de láminas delgadas de las rocas más comunes.

Para llevarla a cabo se han establecido una serie de pasos que de manera ordenada han de llevar a la clasificación de la roca a partir de la identificación de los minerales (paso 1) y de las texturas (paso 2) y, tras la clasificación (paso 3), la determinación del protolito (paso 4) de cada una de ellas.

Material:

- 2 o 3 colecciones de 10 rocas diferentes (pizarra, filita, esquisto, gneis, filita moteada, corneana moteada, cuarcita, mármol, anfibolita, eclogita) que han de preparar los propios institutos. Este tipo de material puede encontrarse en algunos centros universitarios o sedes gubernamentales que disponen de recursos pedagógicos para su préstamo.
- Clasificación simplificada de las rocas metamórficas (Fig. 7).
- Clasificación simplificada de protolitos de las rocas metamórficas (Fig. 8).
- 7 tarjetas de los colores de la roca y los minerales que contiene, en tamaño naipes. El equipo docente debe plastificar las tarjetas con la asignación de un color por una cara y en la otra los minerales (Fig. 9).
- 9 tarjetas de las texturas y tipo de metamorfismo tamaño naipes (Fig. 9). El equipo docente debe plastificar las tarjetas con el nombre de una textura por una cara y en la otra el tipo de metamorfismo asociado.
- 13 descripciones de rocas metamórficas con microfotografías (disponibles en <https://deposit.ub.edu/dspace/handle/2445/180088> (Anexo).

Se espacien los principales tipos litológicos sobre una mesa. Se trabaja en grupos de 8 – 10 alumnos/as la mineralogía y la textura de las rocas para su clasificación.

Paso 1: Identificación de los minerales de las rocas

A partir de la discriminación del color de la roca se van a identificar los minerales presentes. Para ello se extienden sobre la mesa las tarjetas que asocian los colores con los minerales de la roca. El alumno/a debe buscar la tarjeta correspondiente al color general de la roca, de modo que, al consultar el reverso de la tarjeta, esta le indicará la composición mineralógica.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional o contacto	
Cuarcita	Roca dura, formada por más de un 75% de cuarzo. Se puede formar tanto por metamorfismo regional como de contacto

Tabla VI. Clasificación de las rocas cuarcíticas.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional	
Gneis	Roca de tamaño de grano medio a grueso, con microestructura foliada. En las rocas inequigranulares, el aspecto es heterogéneo, con la foliación espaciada, irregular y anastomosada, adaptada a los grandes cristales

Tabla VII. Clasificación de las rocas cuarzo-feldespáticas.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional o contacto	
Mármol puro	Roca dura, formada por más de un 95% de calcita. Se puede formar tanto por metamorfismo regional como de contacto
Mármol impuro	Roca dura, formada por un 95 - 50% de calcita. Se puede formar tanto por metamorfismo regional como de contacto
Roca calcosilicatada	Roca constituida por más de un 50 % de minerales calcosilicatados con orientación preferente formada por metamorfismo regional
Corneana calcosilicatada	Roca constituida por más de un 50 % de minerales calcosilicatados sin orientación preferente formada por metamorfismo de contacto

Tabla VIII. Clasificación de las rocas carbonatadas y calcosilicatadas.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional de P baja e intermedia	
Esquisto verde	Roca de color verde claro, constituida por actinolita (anfíbol verde), clorita, epidota y plagioclasa con orientación preferente
Anfibolita	Roca de color verde oscuro, constituida por hornblenda (anfíbol verde) y plagioclásas con orientación preferente
Granulita	Roca de aspecto granular, constituida por plagioclásas y minerales maficos anhidros (piroxeno, granate)
Regional de P alta	
Esquisto azul	Roca de color azul, anisótropa, constituida por anfíboles sódicos con orientación preferente, además de clorita, epidota, plagioclasa y granate
Eclogita	Roca sin plagioclásas, constituida por más de un 75% de onfacita (piroxeno sódico) y granate con orientación preferente
De contacto	
Corneana hornbléndica	Roca dura, constituida por plagioclásas y hornblenda (anfíbol verde) sin orientación preferente

Tabla IX. Clasificación de las rocas básicas.

TIPO DE METAMORFISMO	DESCRIPCIÓN
Regional	
Serpentinita	Roca verdosa, con más de un 90% de serpentina con orientación preferente
Talcoesquisto	Roca de color blanco, con más de un 90% de talco con orientación preferente

Tabla X. Clasificación de las rocas ultramáficas.

Clasificación de las rocas metamórficas					
	composición				
	pelítica	cuarcítica	carbonatada	cuarzo-feldespática	básica
metamorfismo	Pizarra ^a Filita ^b 1 Esquisto ^c	Cuarcita	Mármol	Gneis	Anfibolita ^a Eclogita ^b 2
	Corneana pelítica i moteada	Cuarcita	Mármol		
	Filita moteada				

1. Clasificación según tamaño de grano. a) < 0,1 mm, b) 0,1 - 0,25 mm, c) > 0,25 mm
 2. Clasificación según mineralogía. a) anfibol verde + plagioclasa, b) piroxeno verde + granate

Fig. 7. Clasificación simplificada de rocas metamórficas.

Paso 2: Identificación de las principales texturas de las rocas

Con los mismos ejemplares se definen las texturas de visu y con la ayuda de las imágenes al microscopio. Una vez asociada la tarjeta que lleva el nombre de la textura principal con la roca se pide al alumno/a que determine el tipo de metamorfismo

que la ha formado. La solución se encuentra en el reverso de la tarjeta.

Paso 3: Clasificación de las rocas

Una vez identificados el tipo de metamorfismo y el grupo composicional, se recurre a la tabla de clasificación para dar nombre a las rocas.

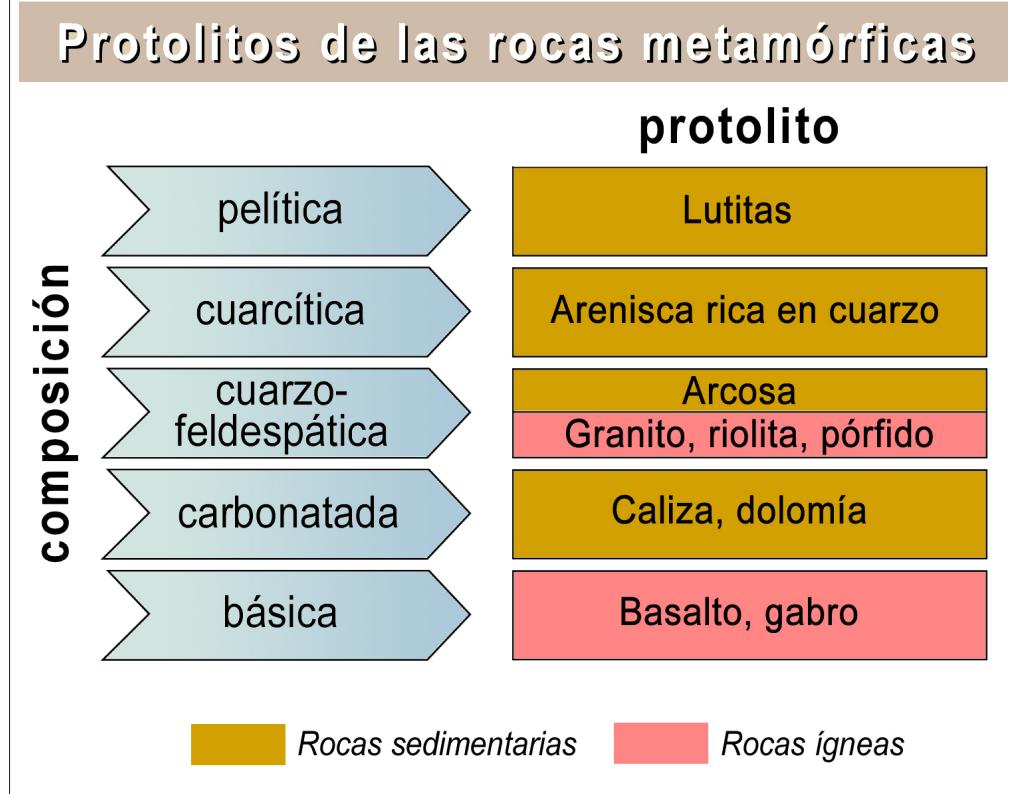


Fig. 8. Clasificación simplificada de protolitos de las rocas metamórficas.



Una vez finalizada la clasificación, se suministrarán las descripciones con microfotografías de las rocas para que el alumnado pueda comparar el aspecto de visu con el de microscopio. De este modo, se podrán ver todos aquellos minerales de tamaño imperceptible a simple vista.

Paso 4: Asignación del protolito

Finalmente, se distribuye la tabla que relaciona el grupo composicional con el protolito de cada roca (ígneo o sedimentario). Llegados a este punto, y si la temporización de la práctica lo permite, sería interesante disponer de las correspondientes rocas parentales, que ya se habrán estudiado en sesiones anteriores, para mostrar al alumnado las transformaciones texturales y minerales que ha supuesto el proceso del metamorfismo.

CONSIDERACIONES FINALES

La descripción y clasificación de las rocas metamórficas, a veces, es un reto para el profesorado de Secundaria y Bachillerato que no está familiarizado con ellas, ya que existe una gran variedad de minerales y texturas que a menudo requieren ser identificados con la ayuda del microscopio petrográfico. Por ello es crítico determinar qué aspectos

son los más relevantes del metamorfismo y cómo aprenderlos. En este trabajo se propone un guion de conceptos básicos que se deben entender, para pasar luego al aprendizaje directamente con las muestras de mano. Con la ayuda de tarjetas que tienen asociados los conceptos textura – tipo de metamorfismo y mineralogía – y grupo composicional, además de microfotografías que han de reforzar la comprensión de las rocas a micro-escala, el alumnado podrá ser capaz de encarar las pautas de este tipo de estudio petrológico y poder aproximarse a las rocas metamórficas con mayor seguridad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte de las actuaciones en la mejora e innovación docente en el campo de la petrología que lleva a cabo el grupo de innovación docente consolidado GRIMS (GINDOC-UB/137) de la Universitat de Barcelona. Las autoras agradecen al editor del volumen monográfico, Hugo Corbí, de la revista de la Asociación Española Para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra (AEPECT) y a los dos revisores del trabajo, Iván Martín y Pedro Castiñeiras, sus valiosos comentarios y sugerencias para la mejora del mismo. También, damos las gracias a Pep Agulló por el diseño de la parte gráfica.

Fig. 9. En fondo verde tarjetas de identificación de textura y asignación de tipo de metamorfismo (en el reverso). En fondo anaranjado tarjetas de identificación de minerales a partir del color de la roca y asignación de grupo composicional (en el reverso).

BIBLIOGRAFÍA

- Abad, I.; Velilla, N. (2018). ¿De qué está hecho este material? Una introducción al uso e interpretación de las técnicas básicas de caracterización de minerales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26.3, 265-273.
- Alías, G.; Aulinas M.; Cantarero, I.; Vilà, M. (2020). *Les textures de les roques: Recull de textures microscòpiques representatives del substrat geològic de Catalunya*. Monografies Tècniques 7. Ed. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, 110 p.
- Alías, G.; Inglès, M.; Liesa, M.; Rosell, L.; Centellas, F. (2008). *Guia de geologia de Collserola*. Diputació de Barcelona. Servei de Parcs Naturals, 173 p.
- Crespo-Blanc, A. (2018). Deformación, metamorfismo y magmatismo: el cóctel de la deformación de las cadenas montañosas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26.1, 35-46.
- García-Casco, A. (2008). *Metamorfismo y Procesos Geológicos*. Página web: <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/petmet/teoria/1metyprocgeol.htm>
- Gil-Crespo, P. P. (2009). *Atlas de mineralogía óptica*. Página web: <http://www.ehu.eus/mineralogiaoptica/>
- Liesa, M.; Alías, G. (1997). *Petrologia de les roques metamòrfiques*. Ed. Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona, 148 p.
- Mangado, X., Alías, G. (2019). *Introducció a les matèries primeres lítiques en arqueologia prehistòrica*. Ed. Soc. Cat. Arqueologia, 60 p.
- Mata Perelló, J.M. (2008). *Guia d'identificació de minerals*. Ed. UPC, 264 p.
- Melgarejo, J.C. (1997). *Atles d'associacions minerals en làmina prima*. Ed. Publicacions Universitat de Barcelona, 1076 p.
- Yardley, B. W. D.; MacKenzie, W.S.; Guilford, C. (1997). *Atlas de rocas metamórficas y sus texturas*. Ed. Masson, 137 p. ■

Este artículo fue recibido el día 20 de enero de 2021 y aceptado definitivamente para su publicación el 10 de abril de 2021.

NOMBRE DE ROCA: ANFIBOLITA

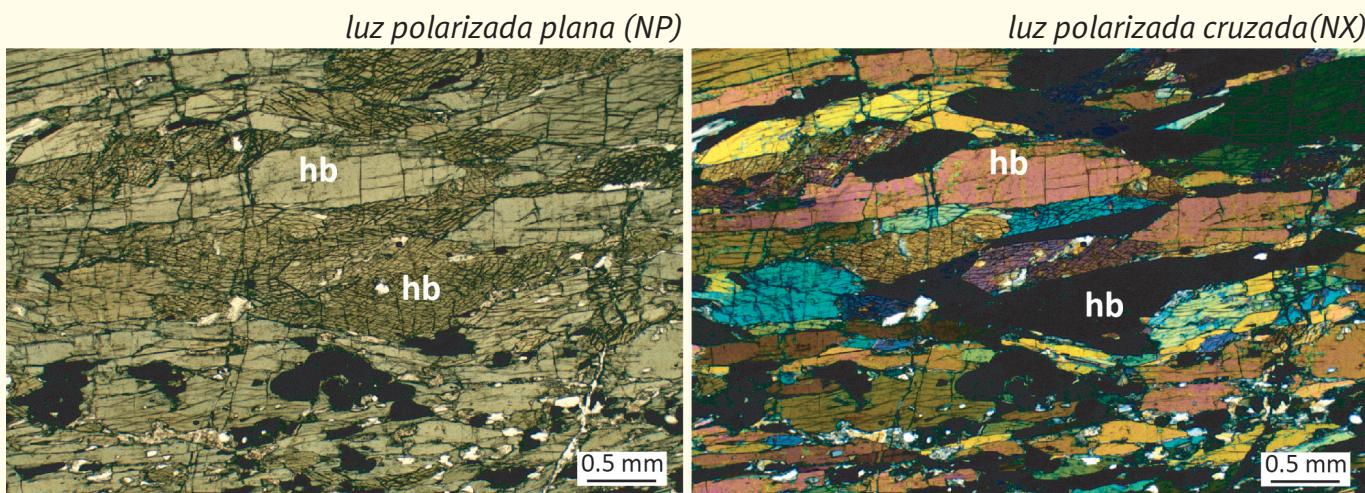
Tipo de metamorfismo: regional

Grupo composicional: rocas básicas

Protolito: gabros, basaltos, diabasas. Más raramente rocas sedimentarias margosas

Condiciones P y T: presión baja a intermedia (aprox. 7 – 35 km) y grado medio (aprox. 400 – 650°C)

Microfotografías

**Descripción**

Las anfibolitas se caracterizan por una fuerte orientación preferente de cristales de hornblenda (hb). Este mineral es un anfíbol de color verde, un silicato de aluminio rico en calcio, hierro y magnesio que tiene forma prismática, de ahí que su ordenación dé lugar a una textural lineal.

En la imagen se observa el aspecto al microscopio en NP, que según el corte de la sección varía de color verde más débil a más intenso, debido al fuerte pleocroísmo de este mineral. Se ven también secciones prismáticas con una exfoliación marcada, así como otras con dos sistemas de exfoliación cruzada 120° (cristal del centro). En NX, estos anfíboles muestran colores de polarización vivos de segundo orden.

Los cristales de la imagen tienen un tamaño superior a los dos milímetros, lo que indica que pueden observarse perfectamente. Sin embargo, la observación en muestra de mano no permitiría definir la calidad de los bordes de grano, para ello es necesaria la imagen de microscopio. En este caso, los cristales son subhexagonales ya que exhiben caras bien formadas, aunque no todas ellas.

La lámina delgada también nos permite detectar la presencia de otros minerales inframillimétricos, en proporciones menores. De un lado, minerales opacos que podrían corresponder a óxidos de hierro, y de otros, cristales de formas redondeadas, anhedrales, de color blanco en NP y tonos grises a blancos en NX. Se trata de cuarzo y plagioclasa.

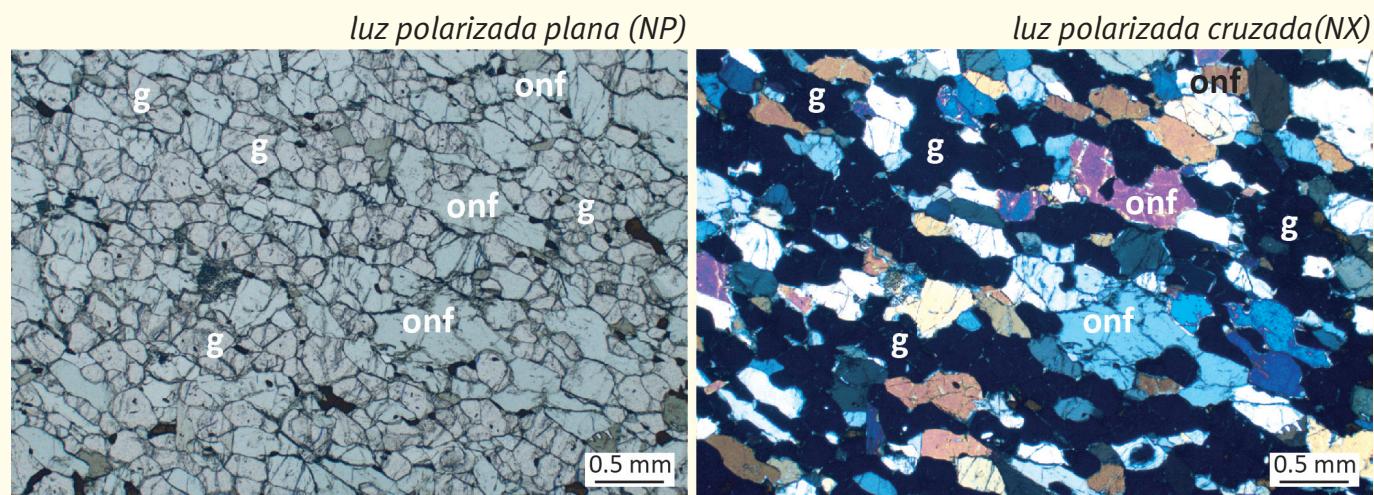
La presencia de plagioclasa en las anfibolitas puede ser muy variable, y puede alcanzar proporciones similares a las de hornblenda.

Información adicional

Las anfibolitas suelen encontrarse en asociación con esquistos o gneises, en áreas de metamorfismo, donde se han formado durante una colisión continental.

NOMBRE DE ROCA: ECLOGITA**Tipo de metamorfismo:** regional**Grupo composicional:** rocas básicas**Protolito:** basaltos, gabros, diabasas**Condiciones P y T:** presión alta (aprox. 35 – 60 km) y grado medio a alto (aprox. 500 – 900°C)

Microfotografías

**Descripción**

Las eclogitas son rocas caracterizadas por una asociación de minerales de densidades muy altas, capaces de soportar las altas presiones a las que se forman. Estos minerales son el *granate* y un piroxeno verde, llamado *onfacita*. A diferencia de otras rocas de composición básica, en las eclogitas destaca la ausencia de plagioclasa.

El granate (g) es un silicato que pertenece al sistema cúbico, por ello se encuentra formando dodecaedros. En estas rocas se reconoce por su color rojizo y abundancia. En la imagen se observan cristales redondeados rosados, anhedrales, muy fracturados. En NX, en cambio, al ser un mineral isótropo permanece totalmente extinguido. Las dimensiones son muy variables según la muestra, pueden alcanzar varios cm como porfidoblastos o cristales que no superan los 0,4 mm como en la microfotografía.

La onfacita (onf) se distingue en muestra de mano por su color verde pálido, aunque a menudo es difícil ver los cristales de visu, ya que suelen ser de dimensiones que no superan el milímetro. En lámina delgada, se reconocen por las formas de prismas cortos, frecuentemente anhedrales, y ese tono suave y colores de polarización (NX) de segundo orden. Según el corte de la sección, pueden observarse los dos sistemas de exfoliación a 90° de los piroxenos.

La textura de las eclogitas viene marcada por un lado por el alineamiento de los piroxenos, que conforman una *textura lineal*, y del otro por el aglomerado de granates que define una *textura granoblástica*.

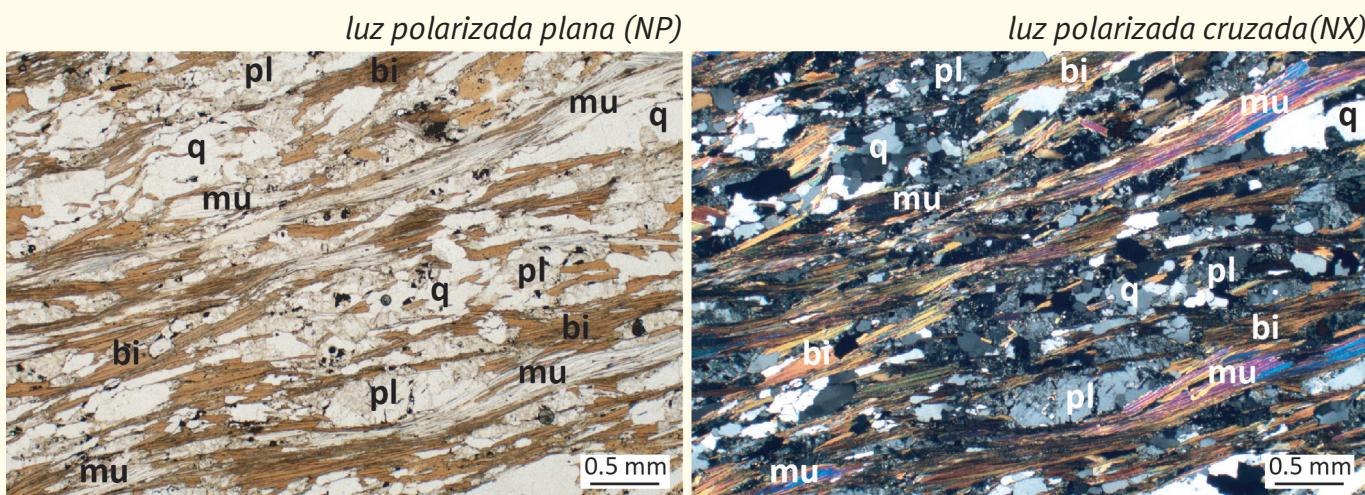
En la imagen se identifican también unos minerales más oscuros, que corresponden a rutilo, y otros de color verde oscuro de hornblenda.

Información adicional

Aunque existen diversos orígenes para las eclogitas, generalmente se las asocia al metamorfismo de una placa oceánica en zonas de subducción.

NOMBRE DE ROCA: ESQUISTO**Tipo de metamorfismo:** regional**Grupo composicional:** rocas pelíticas**Protolito:** lutitas**Condiciones P y T:** presión baja a alta (aprox. 7 – 60 km) y grado medio (aprox. 400 – 650 °C) a alto (>650 °C)

Microfotografías

**Descripción**

Los esquistos se caracterizan por la fuerte orientación preferente de minerales tabulares, en forma de planos, que dan lugar a la *textura foliada*. Estos minerales son micas ricas en potasio y corresponden a *biotita* (bi) (de color marrón en la imagen NP) y a *muscovita* (mu) (incolora). Las condiciones de temperatura, de grado medio a alto, favorecen el crecimiento de estos cristales, de manera que el tamaño de los granos se observa fácilmente de visu a diferencia de las pizarras y filitas. A la textura foliada que exhiben los esquistos se suele denominar a la *textura esquistosa*.

Las micas muestran una exfoliación muy fina, paralela al alargamiento del cristal y se diferencian de otros minerales máficos por su extinción recta. Los cristales de la imagen son subhexagonales y alcanzan los 2 mm de longitud. En NX los colores son de segundo a tercer orden, siendo mucho más vivos los de la moscovita.

En los esquistos, además de las micas, se encuentran también cuarzo (q) y/o feldespatos (pl), aunque siempre en proporciones inferiores. En la lámina delgada ambos minerales son incoloros (NP), mientras que en NX, aun siendo grises a blancos de primer orden, se distinguen porque el primero es inalterable y el segundo muestra un aspecto más sucio, correspondiente a alteración a sericita. En los feldespatos de la imagen, se percibe, además, que tienen un tamaño ligeramente superior (alcanzan 1 mm) y exhiben finas maclas polisintéticas. Ambos minerales son totalmente anhédronas, con borde de granos de rectos a lobulados, y definen un mosaico en la roca denominado *textura granoblástica*.

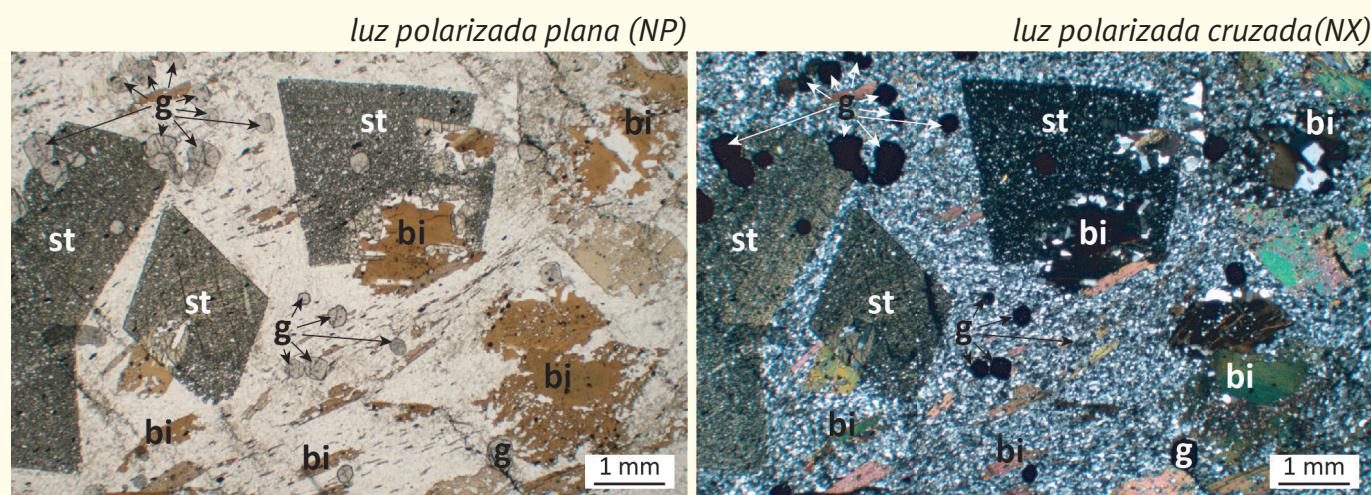
El esquisto de la muestra presenta una asociación mineral muy simple, sin porfidoblastos, pero, aun así, la presencia de muscovita y ausencia de clorita permite su clasificación como de grado medio.

Información adicional

Las micas cristalizan durante el metamorfismo regional perpendicularmente a la presión dirigida asociada a las colisiones tectónicas, de ahí su orientación planar.

NOMBRE DE ROCA: ESQUISTO PORFIDOBLÁSTICO (con estaurolita)**Tipo de metamorfismo:** regional**Grupo composicional:** rocas pelíticas**Protolito:** lutitas**Condiciones P y T:** presión intermedia (aprox. 10 – 35 km) y grado medio (aprox. 400 – 650 °C)

Microfotografías

**Descripción**

En los esquistos de grado medio y alto es muy frecuente la presencia de grandes cristales, de tamaño 10 o más veces superior a la de la matriz, se denominan porfidoblastos y forman una *textura porfidoblástica*. Según sea la composición específica del protolito lutítico y según las condiciones precisas de P y T se pueden formar en la roca diferentes tipos de minerales asociados a las micas y cuarzo característicos de los esquistos.

En la imagen, se observan grandes cristales de color anaranjado muy bien formados (NP) de un silicato de aluminio rico en hierro llamado *estaurolita* (st). Estos alcanzan los 3 milímetros y contienen en su interior numerosas inclusiones de minerales de la matriz que han quedado atrapados durante su crecimiento.

Además, destacan también sobre la matriz, cristales de color marrón de *biotita* (bi) y pequeños cristales redondeados de *granate* (g) (en NX se muestra totalmente extinguido). Algunos cristales de biotita contienen también inclusiones y se ve, a su vez, granate incluido dentro de los cristales de estaurolita.

Todo este tipo de observaciones solo pueden realizarse mediante microscopio y ayuda a los/as petrólogos/as a descifrar parte de la historia geológica de la formación de la roca, como, por ejemplo, cuándo han cristalizado dichos minerales en relación a la deformación de la roca, o cuáles se formaron antes o después.

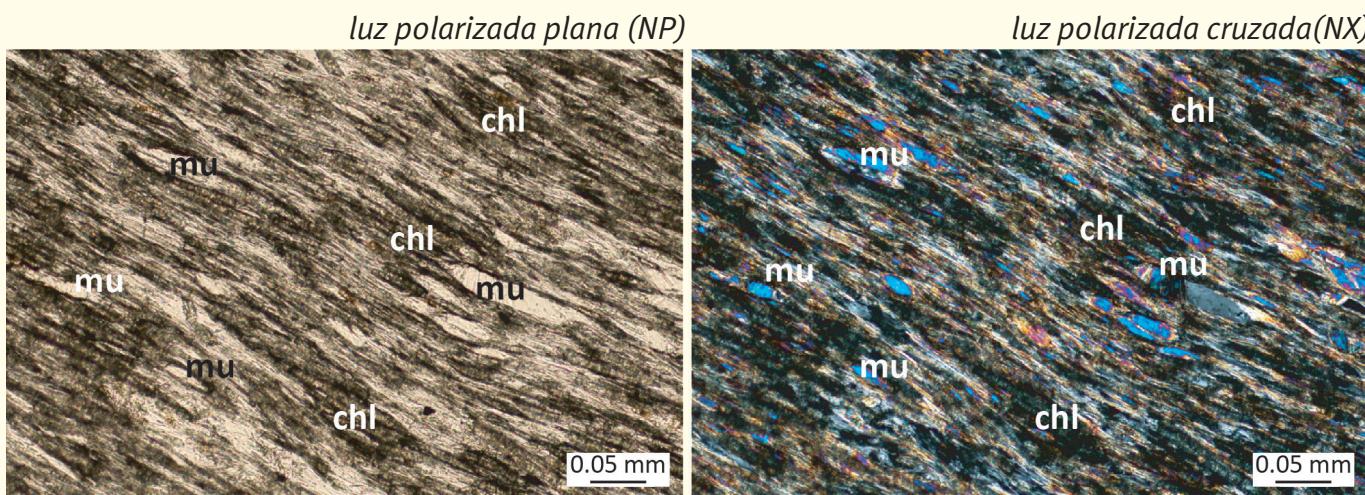
La matriz tiene un contenido importante de cuarzo de ahí el aspecto de mosaico de pequeños cristales equigranulares, de colores grises en NX, que conforman la *textura granoblástica*. También, se observa la orientación preferente de cristales de biotita de tamaño < 0,5 mm, definiendo una *textura foliada* indicativa de que esta roca se ha formado bajo las condiciones de una presión tectónica.

Información adicional

Así como la presencia de granate en equilibrio con estaurolita nos informan de condiciones de P intermedia, otros porfidoblastos como la andalucita o la cordierita son indicativas de P baja.

NOMBRE DE ROCA: FILITA**Tipo de metamorfismo:** regional**Grupo composicional:** rocas pelíticas**Protolito:** lutitas**Condiciones P y T:** presión baja a intermedia (aprox. 7 – 35 km) y grado bajo (aprox. 350 – 400°C)

Microfotografías

**Descripción**

Las filitas son rocas que en muestra de mano se identifican por su elevada fisilidad, es decir rotura en planos, y el aspecto satinado de sus superficies. Raramente se aprecian los minerales de visu, ya que estos no superan los 0,25 mm, por ello es necesario recurrir a la observación de láminas delgadas mediante microscopios petrográficos. La fisilidad de la roca viene determinada por la marcada orientación preferente en planos de los minerales mayoritarios de la roca. Esta textura se denomina *foliada*, y dado que los cristales son imperceptibles en muestra de mano, también se la puede llamar clivaje.

Los minerales principales son filosilicatos, pero a diferencia de los esquistos, estos son *moscovita* (mu) (mica blanca) y *clorita* (chl). Las imágenes nos muestran un corte de la roca perpendicular a la foliación y dado que estos minerales tienen formas tabulares es por lo que podemos observar secciones alargadas. Fijémonos ahora en el tamaño de los cristales mediante la escala gráfica. La mayoría apenas superan los 0,2 mm de longitud. Este tamaño es el responsable del brillo en superficie de esas rocas, a diferencia de las pizarras que su menor tamaño las hace mate.

La moscovita se reconoce por su color incoloro en NP y la clorita por ese aspecto más verdusco. En cambio, en NX las moscovitas resaltan por sus colores vivos de polarización, mientras que la clorita adquiere los tonos más grisáceos.

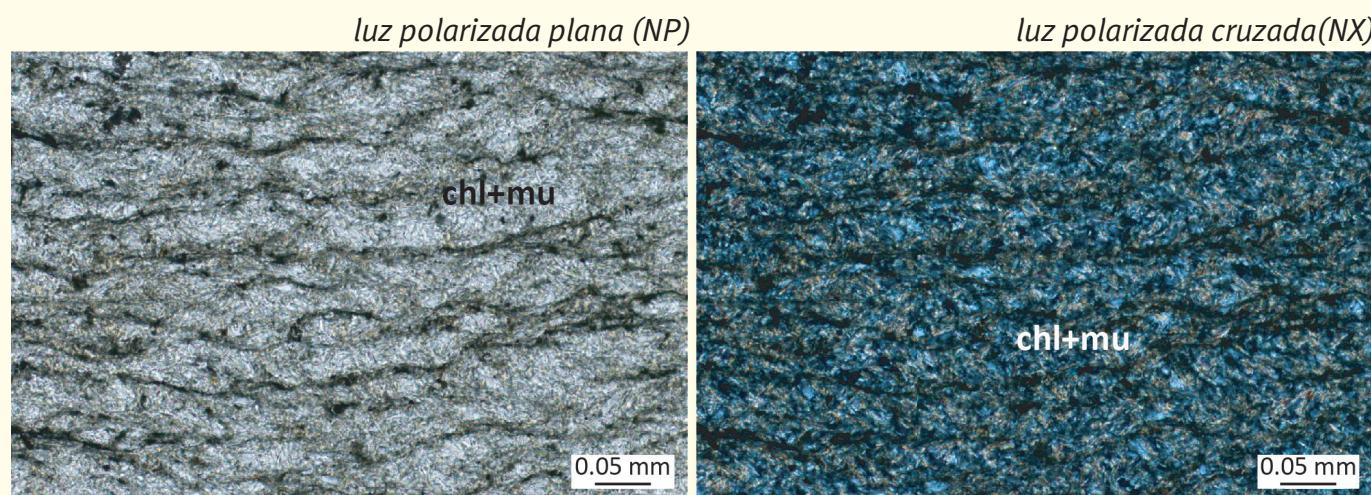
En esta muestra, la presencia de cuarzo apenas destaca, pero se trata de un mineral común en este tipo de rocas.

Información adicional

Las filitas se encuentran en áreas de metamorfismo regional, asociadas a pizarras y esquistos.

NOMBRE DE ROCA: PIZARRA**Tipo de metamorfismo:** regional**Grupo composicional:** rocas pelíticas**Protolito:** lutitas**Condiciones P y T:** presión baja a intermedia (aprox. 7 – 35 km) y grado muy bajo (aprox. 300 – 350°C)

Microfotografías

**Descripción**

Las pizarras se distinguen en muestra de mano por la presencia de superficies planares que se separan muy fácilmente, se dice que son muy fisiles. Generalmente asociamos estas rocas a las cubiertas de techos de muchas viviendas de montaña, donde se identifican además por sus colores oscuros. Igual que en las filitas, estas superficies planares se corresponden con la *textura foliada* que viene definida por la orientación preferente de minerales planares.

Estas rocas provienen de la transformación de limos y arcillas en condiciones metamórficas de grado muy bajo, lo que significa que están prácticamente en el límite de la diagénesis, por ello su tamaño de grano es tan fino, apenas perceptible en muestra de mano, y mucho más fino que el de las filitas, de ahí el aspecto totalmente mate de las superficies. La roca es totalmente equigranular sin formación de porfidoblastos.

En las microfotografías se aprecian en NX una serie de cristales alargados de colores de polarización azulados (*clorita, chl*) y otros de colores amarillentos (*moscovita, mu*). Mirad la escala, apenas alcanzan los 0,03 mm (es decir, 30 micras!), imposible ver estos minerales de visu. El tamaño de grano, la fisibilidad (también llamada pizarrosidad) y los minerales de tipo filosilicatos (*moscovita* y *clorita*) son los tres criterios que permiten clasificar estas rocas.

En la imagen, se ve también un material oscuro en láminas que representa la *materia orgánica* aún preservada en estas rocas y que da el color negro a estas rocas.

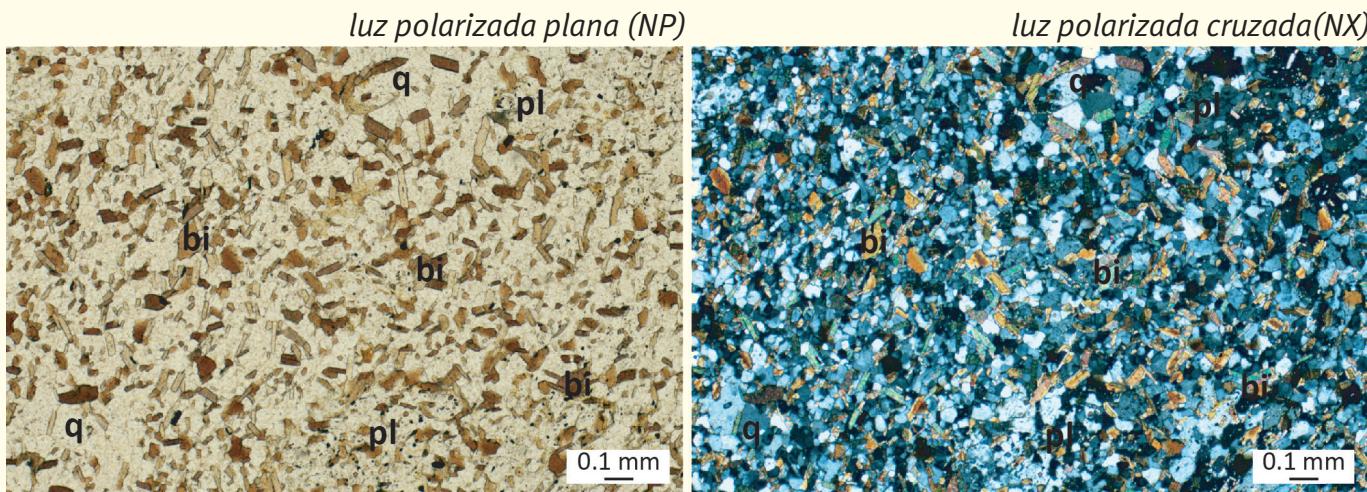
Información adicional

Es muy frecuente en estas rocas reconocer la presencia de caracteres relictos del protolito sedimentario, como laminaciones composicionales, fósiles, o granos detriticos.

Las pizarras se encuentran en terrenos de metamorfismo regional asociadas a filitas y esquistos.

NOMBRE DE ROCA: CORNEANA PELÍTICA**Tipo de metamorfismo:** de contacto**Grupo composicional:** rocas pelíticas**Protolito:** lutitas**Condiciones P y T:** presión baja (aprox. < 15 km) y grado medio (aprox. 400 – 650°C)

Microfotografías

**Descripción**

Tal vez las corneanas sean uno de los tipos de roca metamórfica más difíciles de reconocer en muestra de mano, por un lado, porque son rocas muy oscuras con poco contraste de minerales y por otro por su tamaño de grano fino que, en ausencia de porfidoblastos, impide el reconocimiento de los minerales.

Su estudio en lámina delgada es crucial ya que permite identificar los dos rasgos imprescindibles para su clasificación: la mineralogía y la textura.

Los minerales propios de una corneana pelítica son dos micas ricas en aluminio y potasio: la *biotita* (*bi*) y la *muscovita*, la mica negra y blanca, respectivamente. Y dado que estos minerales cristalizan por el efecto del metamorfismo de contacto significa que su crecimiento es totalmente al azar, no existe ninguna orientación preferente condicionada por alguna presión tectónica. El aspecto de esta disposición desordenada en el espacio se denomina *textura decusada*, y razonablemente es la responsable del aspecto duro y macizo de estas rocas en muestra de mano, por eso no se rompen en planos como los esquistos. En la imagen en NP se observan pequeños cristales de biotitas de color marrón que apenas alcanzan los 0,15 mm y que están organizadas aleatoriamente. En esta muestra en particular no se ven moscovitas, pero sí pequeños cristales de cuarzo (*q*) y algo de plagioclasa (*pl*), de igual tamaño que la biotita. El cuarzo en NP es incoloro y en NX de colores blancos a grises de primer orden. La plagioclasa se le parece mucho, pero muestra pequeñas inclusiones y localmente se observa alguna macla polisintética. Ambos minerales tienen forma bastante redondeada, anhedrales, y configuran una *textura granoblástica*.

Información adicional

En función del grado metamórfico y la composición exacta de la roca, las corneanas pelíticas pueden presentar abundantes y diminutos porfidoblastos que dan un aspecto moteado a la roca, igual que en las filitas moteadas. Estos porfidoblastos suelen ser de cordierita o andalucita, ambos silicatos ricos en aluminio, cuya formación está relacionada con condiciones de baja P, es decir profundidades relativamente someras de la corteza donde suelen emplazarse gran parte de los batolitos.

NOMBRE DE ROCA: FILITA MOTEADA (con cordierita)

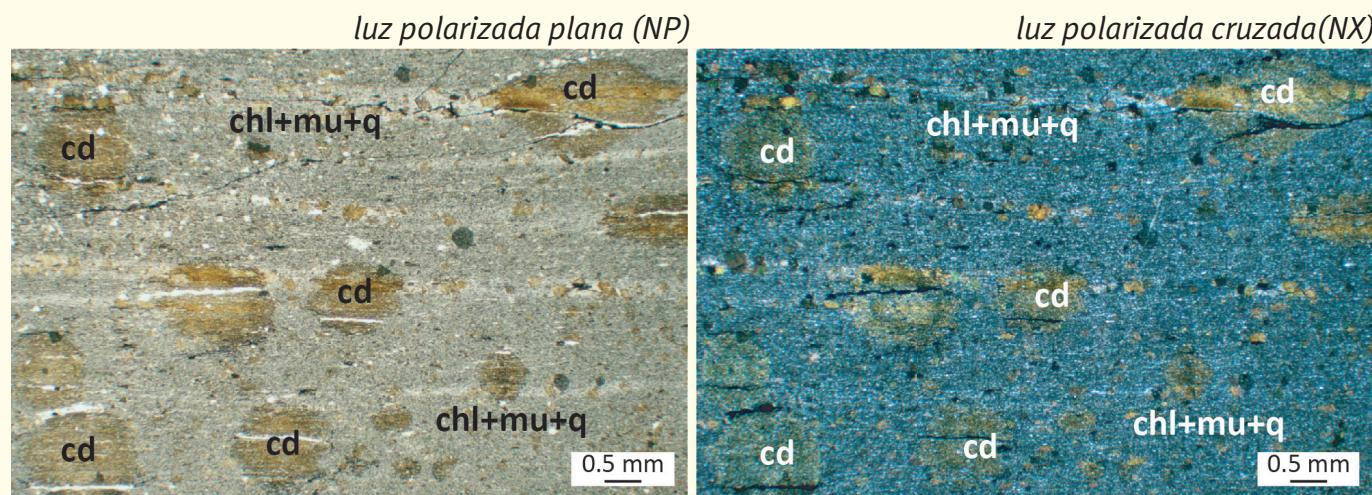
Tipo de metamorfismo: regional y de contacto

Grupo composicional: rocas pelíticas

Protolito: lutitas

Condiciones P y T: presión baja (aprox. < 15 km) y grado medio (aprox. 400 – 650°C)

Microfotografías

**Descripción**

Este tipo de roca supone hablar de una roca formada por los efectos de dos metamorfismos: el regional y el de contacto.

En muestra de mano se reconoce una foliación muy marcada cuyos planos muestran un brillo satinado. En lámina delgada la *textura foliada* viene determinada por la orientación preferente de *muscovita* (mu) y *clorita* (chl), mientras que el brillo está relacionado con el tamaño de grano situado en el límite de los 0,1 mm. Los cristales no se llegan a ver, pero son suficientemente grandes para que reflejen la luz. En la imagen en NX, se ve una matriz azulada y amarillenta correspondiente a estos dos minerales alargados, además de algún cristal de cuarzo (q) elongado de color gris claro. Tanto la orientación preferente como la elongación son indicativas de una presión tectónica ejercida sobre esta roca por lo que se deduce que su formación está asociada a un metamorfismo regional.

Sin embargo, en la muestra destacan sobre todo en NP una serie de “manchas” de color marronoso de tamaños diversos. Se trata de pequeños porfidoblastos redondeados a ovalados, de 0,5 a 3 mm de longitud. Corresponde a un silicato ferromagnésico rico en aluminio llamado *cordierita* (cd) que se forma habitualmente en condiciones metamórficas de baja presión. La disposición de este mineral aparenta un salpicado de motas, de ahí el nombre de *textura moteada*. El color marrón que observamos, de hecho, no es el color natural de este mineral sino una alteración muy característica que ópticamente la hace casi inconfundible con otros minerales.

En NP se observan pequeñas inclusiones de minerales dentro de los porfidoblastos de cordierita. Si os fijáis se ve que siguen un alineamiento igual que el de la matriz. En geología interpretamos esta relación como un crecimiento del porfidoblasto posterior a la matriz. Y dado que el moteado es una textura que se adquiere por metamorfismo de contacto, nos indica que este metamorfismo tuvo lugar posteriormente al regional. Estas observaciones son muy relevantes para la interpretación de la evolución de las cordilleras montañosas antiguas.

NOMBRE DE ROCA: FILITA MOTEADA (con quiastolita)

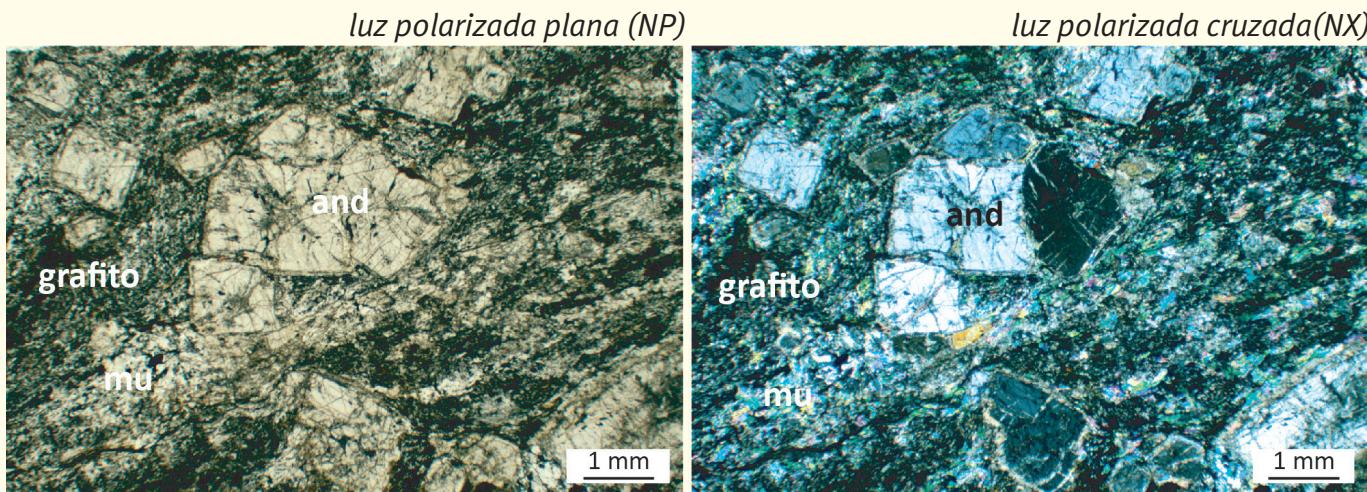
Tipo de metamorfismo: regional y de contacto

Grupo composicional: rocas pelíticas

Protolito: lutitas

Condiciones P y T: presión baja (aprox. < 15 km) y grado medio (aprox. 400 – 650°C)

Microfotografías

**Descripción**

Esta roca representa en muestra de mano una filita de color muy oscuro y con una foliación muy marcada, en este sentido comparte características de cualquier roca pelítica rica en grafito formada por metamorfismo regional. Sin embargo, en las superficies de foliación destacan pequeños cristales prismáticos, blancos, milimétricos que parece un patrón de chispas blancas, con disposición aleatoria, típica de un metamorfismo de contacto en el que los esfuerzos dirigidos no juegan un papel importante.

En las imágenes al microscopio pueden verse estas dos características claramente. Por un lado, resaltan sobre la matriz oscura varios porfidoblastos bien formados, incoloros en NP y grises en NX, con secciones cuadradas, de máximo 2 mm de diámetro y alguna sección prismática (en el extremo inferior derecho). Este mineral corresponde a un silicato de aluminio llamado *andalucita* (and), que muestra numerosas inclusiones carbonosas con disposición cruciforme en su interior (esta variedad recibe el nombre de quiastolita). La abundancia de porfidoblastos de aspecto chispeado en la roca motiva el atributo de *textura moteada*, y la falta de orientación de los mismos configura, a su vez, una *textura decusada*.

Por otro lado, vemos la matriz que exhibe una orientación preferente marcada tanto de la materia orgánica (*grafito*) como de la *muscovita* (mu) (cristales prismáticos en NX de colores muy vivos) responsables de la *textura foliada* de la roca. El tamaño del grano es fino, apenas llega a los 0,2 mm, por ello decimos que esta roca es una filita (y no una pizarra o esquisto).

Igual que en la filita moteada con cordierita, la interrupción de la foliación por cristales decusados de andalucita permite interpretar que estos cristalizaron posteriormente a la foliación de la matriz durante un metamorfismo de contacto.

Información adicional

Los aluminosilicatos (andalucita, cianita, sillimanita) son un grupo de minerales que comparten la misma fórmula (Al_2SiO_5) pero tienen distintas configuraciones cristalográficas según las condiciones de P y T.

NOMBRE DE ROCA: MÁRMOL PURO

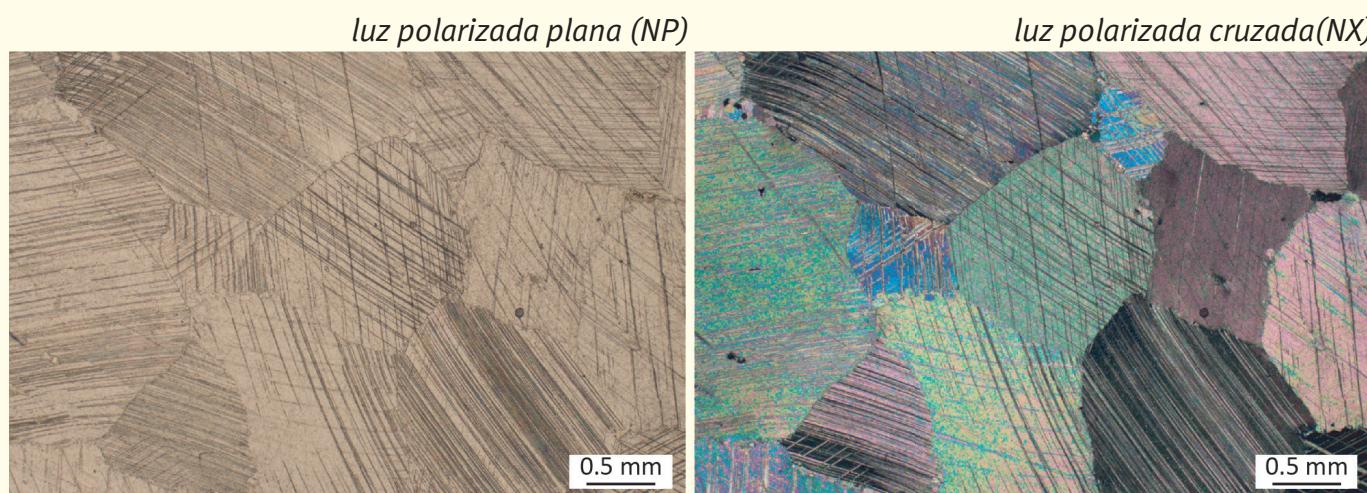
Tipo de metamorfismo: regional o de contacto

Grupo composicional: rocas carbonatadas

Protolito: caliza

Condiciones P y T: en todo el rango del metamorfismo

Microfotografías

**Descripción**

Los mármoles son rocas muy simples a nivel mineralógico, ya que están constituidas esencialmente por *calcita*. Sin embargo, la presencia de otras especies minerales, permite diferenciar entre mármoles puros o impuros.

La calcita es un carbonato de calcio que presenta formas anhedrales en las rocas metamórficas. Con el aumento del grado metamórfico, los cristales de calcita van aumentando su tamaño a causa de un proceso de recristalización que permite la reducción de la superficie de los granos y eliminación de los más pequeños. De este modo, se consigue además que los bordes de grano se alisen y sean rectos hasta formar puntos triples poligonales a 120° como se ve en las imágenes.

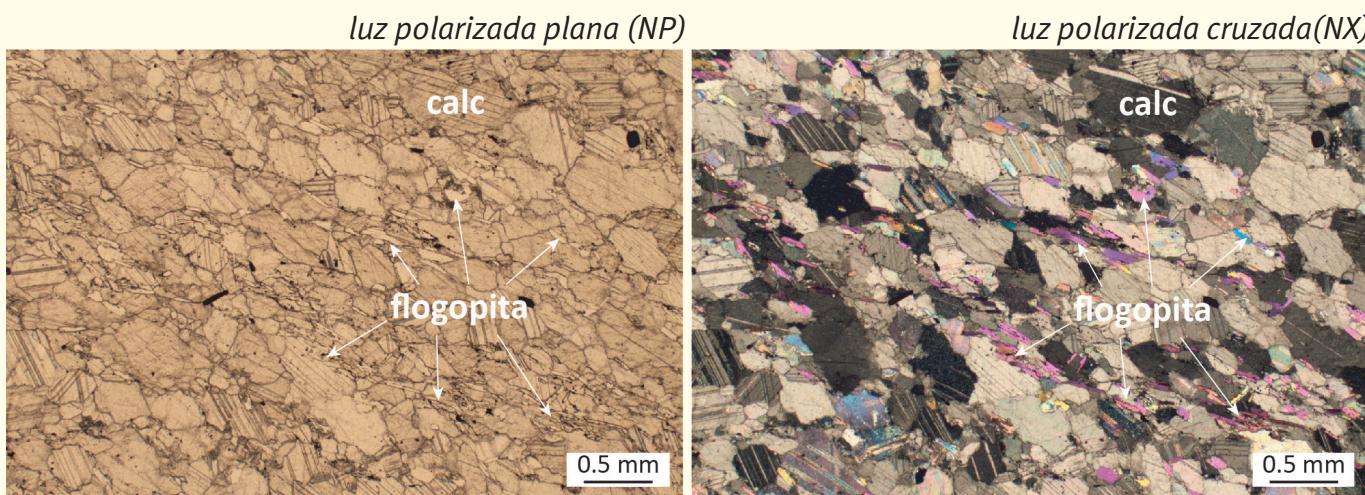
En las imágenes se aprecia un agregado poligonal equigranular de cristales de calcita que conocemos por *textura granoblástica*. La calcita en lámina delgada es incolora (NP) y presenta maclas lamelares que se reconocen por uno o dos sistemas cruzados a 120° . Los colores de interferencia (NX) muestran colores muy vivos debido a su alta birrefringencia.

Información adicional

Los mármoles forman unidades litológicas asociadas a otras rocas de composiciones variadas (pelítica, cuarcítica, ...). Se pueden formar tanto por metamorfismo regional como de contacto. Y aunque pudiera pensarse que bajo condiciones de presión tectónica los mármoles deberían estar estirados, lo cierto es que en la mayoría de los casos permanecen no deformados debido a que la fuerza de cristalización se contrarresta con la tectónica.

NOMBRE DE ROCA: MÁRMOL IMPURO**Tipo de metamorfismo:** regional o de contacto**Grupo composicional:** rocas carbonatadas**Protolito:** caliza, dolomía**Condiciones P y T:** en todo el rango del metamorfismo

Microfotografías

**Descripción**

Como sabemos, los mármoles son rocas monominerales ricas en calcita. Sin embargo, a veces encontramos en estas rocas otros minerales que coexisten con la calcita. De ahí que diferenciamos los mármoles puros (con más del 95% de calcita) de los impuros (la calcita domina en la roca, pero se encuentra entre un 50 – 95%).

La foto de la imagen es buen ejemplo. El mineral dominante es la *calcita* (*calc*) que reconocemos por ser incolora, con un ligero tono rosado (NP) y con maclas lamelares (ese dibujo rayado que muestran muchos cristales). La forma de los cristales está algo alargada según una de las diagonales de la imagen, pero en su conjunto el mosaico de granos más o menos equigranulares muestra una *textura granoblástica* común. El tamaño de los granos mayores llega a los 0,6 mm.

Junto con la calcita se distingue otro mineral de hábito y colores diferente. Se trata de *flogopita*, una mica rica en magnesio de la que nosotros estamos viendo la sección rectangular de este mineral planar. Se caracteriza porque en NP es incoloro a marrón muy claro y en NX por sus colores muy vivos de segundo orden. Si mirásemos su ángulo de extinción veríamos que es casi recto (2 – 4°). Se observa que los cristales están completamente orientados, en la misma dirección que la elongación de la calcita, y definen una *textura foliada*.

Tanto la elongación como la orientación preferente de la calcita y la flogopita, respectivamente, son indicativas de la existencia de una presión dirigida en el momento de la cristalización de ambos minerales, hecho que supone que el tipo de metamorfismo que dio lugar a esta roca era regional.

Información adicional

En los mármoles impuros los minerales que pueden acompañar a la calcita y dolomita son muy diversos: talco, tremolita, diópsido, forsterita, wollastonita, grosularia, vesubianita, epidota, etc, según el grado metamórfico y la composición precisa de la roca.

NOMBRE DE ROCA: CUARCITA

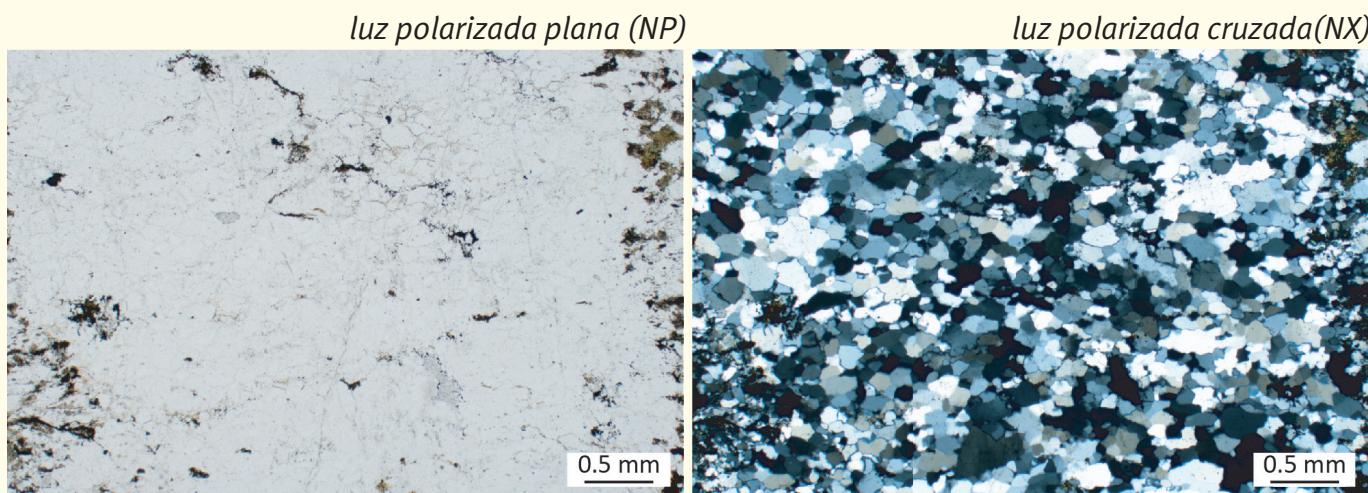
Tipo de metamorfismo: regional o de contacto

Grupo composicional: rocas cuarcíticas

Protolito: arenisca rica en cuarzo

Condiciones P y T: en todo el rango del metamorfismo

Microfotografías

**Descripción**

Las cuarcitas, igual que los mármoles, son rocas monominerales relativamente simples de describir. El mineral dominante de las cuarcitas es el *cuarzo*, un mineral blanco, de brillo vítreo, que sabemos que podemos distinguir en muestra de mano mediante una simple comprobación de la dureza ya que raya el vidrio.

En lámina delgada el cuarzo es incoloro en NP y, en cambio, en NX muestra colores de interferencia de blancos a grises de primer orden. No presenta exfoliación alguna. Estas propiedades ópticas son muy útiles para diferenciarlo de la calcita en caso de duda.

En las rocas metamórficas suele ser anhedral con bordes de granos rectos como se ve en la imagen de NX, aunque según la deformación podrían ser más irregulares. El mosaico de granos equigranular da lugar a la denominada *textura granoblástica*, y dada la naturaleza de los bordes se dice que es *poligonal*.

El tamaño de grano de las cuarcitas es muy variable, ya que depende del tamaño del grano original de la arenita de la cual procede. En cualquier caso, el aumento de la temperatura provoca un crecimiento de los cristales que van soldándose unos con otros con el fin de disminuir la energía libre superficial. A más T mayor tamaño. En la imagen, los cristales de cuarzo varían entre 0,1 y 0,5 mm.

Acompañado a los cristales de cuarzo pueden encontrarse en la roca pequeñas proporciones de minerales opacos, alguna mica y otros.

Información adicional

Dado que el cuarzo es un mineral muy estable en todo el rango de condiciones metamórficas de P y T, las cuarcitas son rocas muy poco útiles para caracterizar la intensidad del metamorfismo. La textura granoblástica tampoco es diríamente del tipo de metamorfismo (regional o de contacto) ya que el crecimiento de los granos, aun teniendo lugar bajo presiones dirigidas, se equilibran con la fuerza de cristalización.

NOMBRE DE ROCA: GNEIS

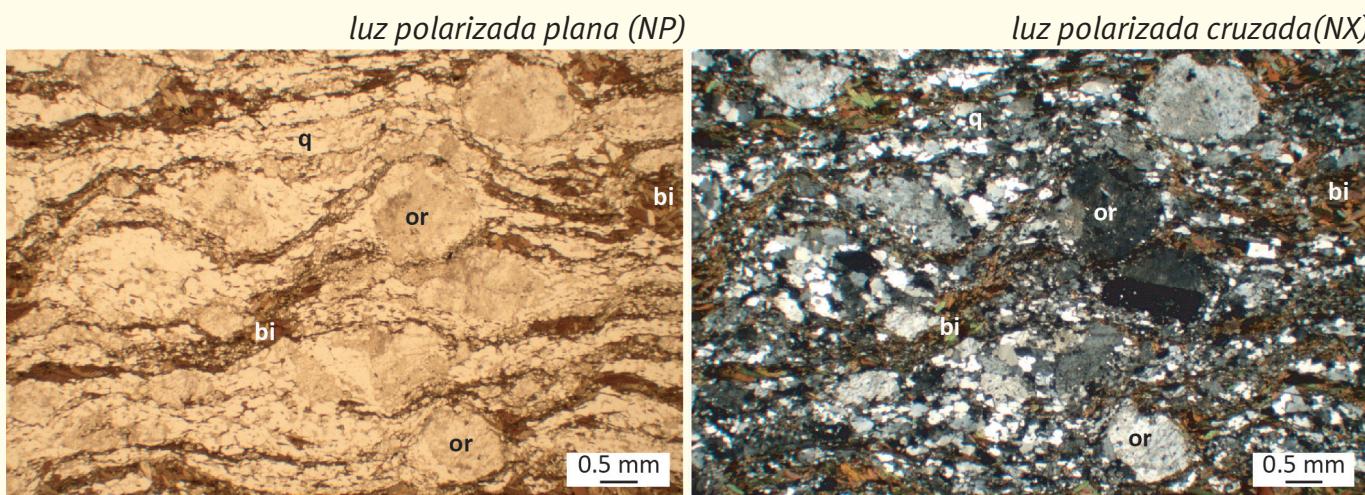
Tipo de metamorfismo: regional

Grupo composicional: rocas cuarzo-feldespáticas

Protolito: granito (y rocas afines) o arcosas

Condiciones P y T: en todo el rango del metamorfismo

Microfotografías

**Descripción**

Frecuentemente la clasificación de un gneis nos parece algo muy sencillo, tal vez porque nos quedamos con una imagen instantánea de una roca de colores claros, rica en cuarzo y en feldespatos, que nos recuerda a un “granito” aplastado. Y ciertamente esa primera aproximación no va muy desencaminada, pero merece la pena tener en cuenta que según sea el tamaño de grano del protolito, la textura inicial, las proporciones entre los minerales mayoritarios o la intensidad de la deformación, las texturas de esta roca pueden ser muy diversas.

En la imagen se muestra un aspecto muy habitual conferido por la presencia de grandes cristales, más o menos, redondeados de feldespato, que se hallan envueltos una matriz laminada.

Los grandes cristales. Es ortosa (or) es un feldespato potásico que se reconoce por su aspecto algo sucio en NP y colores grises en NX, y la presencia de alguna macla simple. Resaltan por su tamaño respecto a la matriz y texturalmente se denominan *porfidoclastos* porque se interpreta que ya existían en la roca original y no se han formado durante el metamorfismo. ¿Cómo podemos deducir esto? Pues por su relación con la matriz.

La matriz. Se caracteriza por una textura laminada según niveles ricos en minerales marrones (*biotitas*) y otros ricos en minerales grises (en NX) correspondientes a cuarzo (q) y feldespato. Los cristales de biotita (bi) están alineados y forman la *textura foliada*, mientras que los otros minerales dibujan un mosaico de granos con *textura granoblástica*. Fijémonos cómo la foliación se adapta totalmente a los grandes cristales, esto es debido a que durante el metamorfismo regional la presión tectónica permitió la reorientación y recristalización de la biotita alrededor de cristales más duros y resistentes.

Información adicional

Es difícil determinar el grado de metamorfismo ya que, al tratarse de una roca tan rica en cuarzo y feldespato, las reacciones metamórficas son escasas.

