

Las rocas ígneas en el microscopio petrográfico: estrategias y recursos para su aprendizaje

Igneous rocks under the petrographic microscope: learning strategies and tools

MERITXELL AULINAS JUNCÀ¹, ALEJANDRO RODRIGUEZ-GONZALEZ², GEMMA ALÍAS LÓPEZ¹, FRANCISCO JOSÉ PEREZ-TORRADO², HELENA ALBERT MÍNGUEZ¹, M. CARMEN CABRERA SANTANA² Y CARMEN M. AGUILAR GIL¹

¹ Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada, Universitat de Barcelona, Martí Franquès s/n, 08028 Barcelona. E-mail: meritxellaulinas@ub.edu; galias@ub.edu; halbert@ub.edu; carmenmaguilar@ub.edu

² Grupo de investigación GEOVOL, Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (i-UNAT), Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, 35017 Las Palmas de Gran Canaria. E-mail: alejandro.rodriguezgonzalez@ulpgc.es; franciscojose.perez@ulpgc.es; mcarmen.cabrera@ulpgc.es

Resumen Desde los inicios de la formación de la Tierra, los procesos magmáticos han sido vitales en la creación de corteza oceánica y continental, en la expansión de los fondos oceánicos o en la formación de los márgenes continentales. Las rocas ígneas son los testigos de estos procesos y su estudio es crucial para un buen entendimiento del origen, formación y evolución de nuestro planeta. Por ello, la observación de las rocas ígneas en el microscopio petrográfico es decisiva ya que nos permite realizar un análisis detallado sobre las texturas y los minerales que las forman. El mayor obstáculo para el estudio petrográfico de las rocas en los centros de secundaria y bachillerato es no tener acceso regular a una herramienta esencial como es el microscopio petrográfico. Para mitigar esta carencia, en este trabajo se ha diseñado un catálogo virtual de imágenes de microscopio de rocas ígneas que afloran en territorio español. Esta herramienta didáctica, que combina la descripción e identificación de rocas ígneas en el microscopio con el programa Google Earth, tiene por objetivo enseñar petrografía de un modo ameno y activo, a la vez que fortalecer la adquisición de habilidades científicas y tecnológicas entre el alumnado.

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

Abstract *Since the beginning of the Earth's formation, magmatic processes have been essential in the creation of oceanic crust, in the expansion of the ocean floor or in the formation of continental margins. Igneous rocks are witness of these processes and their study is crucial for a good understanding of the origin, formation, and evolution of our planet. Observation of igneous rocks under the petrographic microscope is decisive as it allows us to carry out a detailed analysis of the textures and minerals forming them. The greatest obstacle to the petrographic study of rocks in secondary and high schools is not having regular access to an essential tool, such as the petrographic microscope. To mitigate this limitation, we have designed a virtual catalogue of microscope images of igneous rocks that outcrop in the Spanish territory. This didactic tool, which combines the description and identification of igneous rocks under the microscope with the Google Earth software, aims to teach petrography in a pleasant and active way, while strengthening the acquisition of scientific and technological skills among students.*

Keywords: *Igneous rocks, microscopy, minerals, petrography, teaching resource, textures.*

INTRODUCCIÓN

Las rocas ígneas son el producto del enfriamiento y solidificación de magmas que normalmente se generan en el manto (generalmente la astenosfera) y en la corteza inferior por la fusión parcial de las principales rocas que las forman. El ascenso de los

magmas a través de la corteza puede ser directo y continuo hacia la superficie o, como sucede en muchas ocasiones, estancarse de manera permanente o temporal si las condiciones litológicas y estructurales son desfavorables para el ascenso (Aulinas *et al.*, 2018). En caso de estancamiento permanente, el magma se enfría y da lugar a cuerpos y rocas intrusi-

vas (plutónicas e hipoabisales o subvolcánicas). En cambio, si el estancamiento es temporal, el ascenso del magma hacia la superficie continúa después de un período de interrupción dando lugar a rocas extrusivas (volcánicas). Dado que las condiciones físicas y químicas dentro de la corteza y en superficie son bien distintas, las rocas ígneas que se forman en un u otro ambiente también resultarán muy distintas. El aspecto final de las rocas ígneas está fuertemente condicionado, entre otros factores, por el lugar de emplazamiento y, en consecuencia, por la velocidad de enfriamiento de los magmas. Así, los magmas en profundidad, rodeados de rocas sometidas a temperaturas y presiones más altas que en superficie, se enfrían lentamente y cristalizan por completo dando lugar a rocas plutónicas, con cristales a menudo identificables a simple vista, sin la ayuda de un microscopio. Por el contrario, un rápido enfriamiento del magma en superficie favorece la formación de vidrio volcánico e inhibe el crecimiento de los cristales, haciendo que éstos tengan un tamaño muy reducido. El resultado final es la formación de rocas volcánicas en las que la identificación de sus componentes requiere del microscopio petrográfico. Las rocas hipoabisales o subvolcánicas, a pesar de ser rocas intrusivas, son el resultado de un enfriamiento bastante rápido del magma emplazado a poca profundidad dentro de la corteza, por lo que parte de los cristales que las forman son únicamente visibles mediante el microscopio.

De todo esto se desprende que tanto la descripción textural y mineralógica de las rocas ígneas, esenciales en cualquier estudio petrológico, precisa del uso del microscopio petrográfico para llevar a cabo la identificación y clasificación de las rocas ígneas. Si bien es cierto que el estudio de las rocas comienza a escala de afloramiento y de muestra de mano, los análisis más detallados sobre los minerales que forman la roca y las relaciones entre sus distintos componentes se realizan mediante el microscopio petrográfico (Donaire y Pascual, 2012).

A pesar de que el microscopio petrográfico resulta ser una herramienta esencial en la descripción e identificación de las rocas ígneas, también es cierto que muchos de los centros de secundaria y bachillerato no tienen un acceso regular a este tipo de recurso. La mayoría de los centros escolares, incluso los que enseñan Geología como asignatura, no tienen suficientes microscopios para impartir clases prácticas y, si los tienen el profesorado no siempre tiene la formación suficiente para llevar a cabo esta tarea. A todo esto, se le añade la vulnerabilidad de la enseñanza práctica presencial en circunstancias excepcionales como las vividas por una pandemia mundial. Por todo ello, en este artículo se presenta una revisión de las principales características texturales y mineralógicas de las rocas ígneas, una recopilación de los recursos en la red sobre rocas ígneas vistas al microscopio, así como un nuevo recurso didáctico en el que se combina la descripción e identificación de rocas ígneas en el microscopio con el programa de información Google Earth. Todo el material gráfico generado en este artículo está disponible en el Dipòsit Digital de la Universitat de Barcelona, a través del enlace <http://hdl.handle.net/2445/179947>.

TEXTURA Y MINERALOGÍA: LAS CLAVES PARA UNA BUENA IDENTIFICACIÓN DE LAS ROCAS ÍGNEAS

Las texturas de las rocas ígneas

Los datos que nos aportan el estudio de las texturas y las asociaciones minerales en lámina delgada son de un valor esencial para interpretar la génesis de las rocas ígneas. El término textura en estas rocas se refiere a las relaciones geométricas entre los minerales u otros componentes de la roca (tales como vesículas y vidrio volcánico), atendiendo esencialmente a su tamaño, forma y distribución (p.ej. Franco y Gonzalo, 2000). La aplicación de términos descriptivos a las rocas en sus aspectos texturales requiere el uso de criterios unificados, con el fin de hacer descripciones lo más exhaustivas y breves posibles, y a la vez entendibles por cualquiera de forma inequívoca (Castro, 2015). Los principales criterios texturales (grado de cristalinidad, tamaño y distribución de grano, forma de los cristales, y relación mutua entre los componentes) se tratan brevemente a continuación. Para un mayor conocimiento sobre texturas de rocas ígneas se remite al lector a los manuales de Castro (2015), MacKenzie *et al.* (1996) o Vernon (2004).

Grado de cristalinidad

El grado de cristalinidad de una roca ígnea se mide por la cantidad relativa de cristales¹ y vidrio, de tal modo que una cristalinidad completa se define a través del término holocristalino (Fig. 1A,B), mientras que una cristalinidad parcial se expresa con el término hipocristalino (Fig. 1C,D). En el caso de una roca parcialmente vítrea, el término a utilizar es hipohialino, mientras que en aquellos casos en que la roca está formada mayoritariamente por vidrio la denominamos vítrea o hialina (Fig. 1E,F).

¿Cómo se forma el vidrio volcánico?

La formación del vidrio volcánico se relaciona con un descenso brusco de la temperatura del magma por debajo de la temperatura a la cual se inicia la cristalización, es decir, por debajo de la temperatura *liquidus*. En estas condiciones de sobreenfriamiento, los átomos, iones o moléculas no tienen tiempo de organizarse para formar cristales, de modo que el líquido pasa a formar una sustancia amorfa como es el vidrio. La facilidad para pasar de líquido a vidrio depende de la viscosidad del magma que, a su vez, depende de su composición química. Así, los magmas félsicos, ricos en SiO₂, tienen una mayor facilidad dado el alto grado de polimerización que presentan (largas cadenas de [SiO₄]⁴⁻), lo que provoca una elevada viscosidad, que dificulta el movimiento de los átomos. En cambio, el paso resulta más difícil en el caso de los magmas máficos, pobres en SiO₂ y con una baja polimerización debido a la presencia de cationes (Mg, Fe) o grupos hidroxilos ([OH]) que pueden llegar a romper el entramado de tetraedros de [SiO₄]⁴⁻ y por lo tanto reducir la polimerización (Vernon, 2004; Castro, 2015).

Dado que el vidrio es una sustancia metaestable, puede cristalizar si las condiciones son favorables. Este proceso llamado desvitrificación suele implicar la formación de cristales aciculares o den-

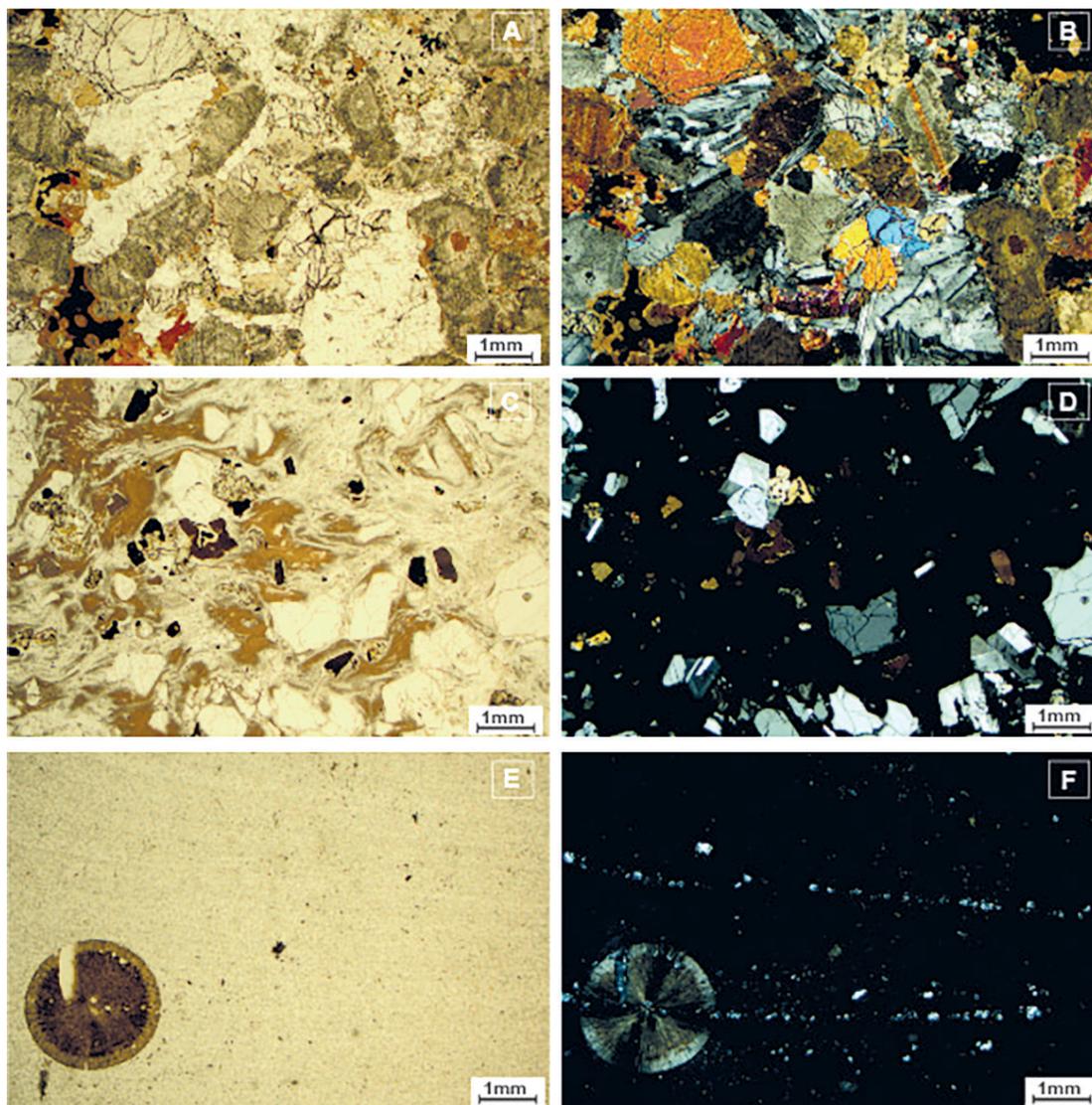


Fig. 1. Cristalinidad de las rocas ígneas. Microfotografías A, C y E en luz polarizada plana, B, D y F en luz polarizada cruzada. A y B muestran una cristalinidad completa, holocristalina. C y D se corresponden a una muestra con cierto porcentaje en vidrio (marrón e incoloro en C, isótropo, negro, en D), presenta una cristalinidad hipocristalina. E y F ilustran una muestra vítrea o hialina.

dríticos con crecimiento radial (esferulitos) que dan lugar a texturas esferulíticas (Fig. 2A,B). Por otra parte, la contracción del vidrio debido al enfriamiento brusco del magma da lugar a la formación de fracturas concéntricas que producen lo que se denomina una textura perlítica (Fig. 2C,D).

Tamaño y distribución de grano

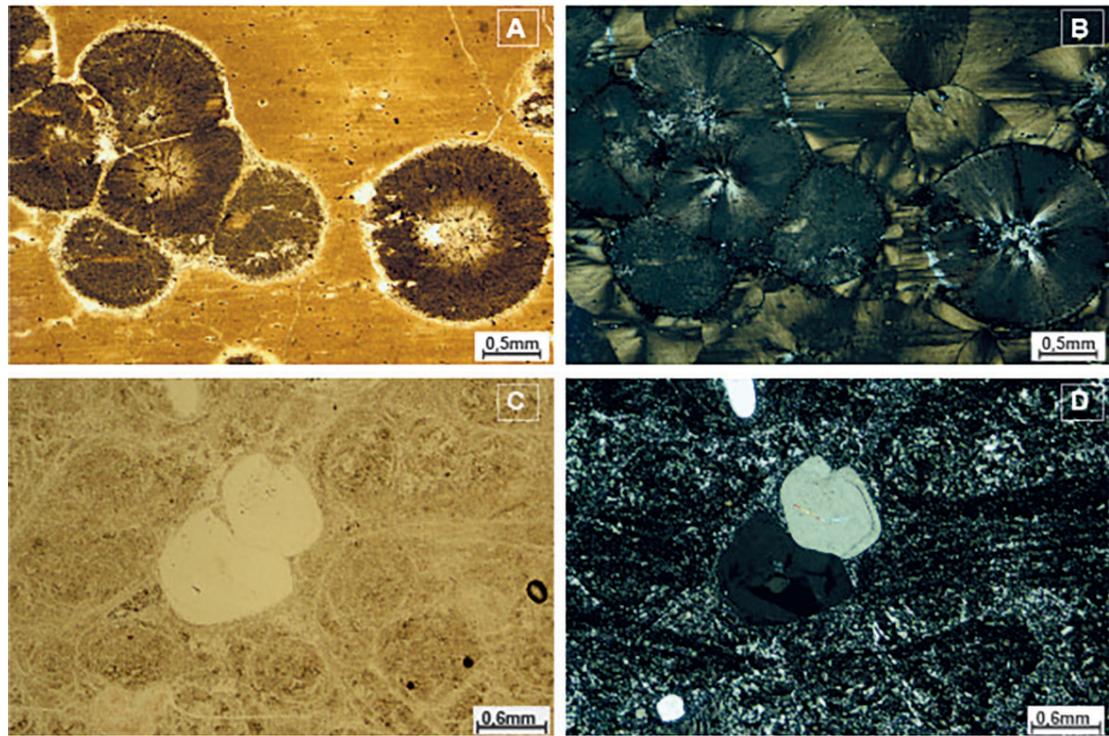
La granularidad define el tamaño de grano de los componentes (principalmente minerales) que forman la roca ígnea. El tamaño, que puede variar considerablemente, depende de la tasa de nucleación de cristales y del enfriamiento del magma. Teniendo en cuenta el tamaño de los granos, las rocas ígneas se dividen en dos grupos: a) las rocas faneríticas (Fig. 3A, B), en las que los componentes de la roca se distinguen a simple vista o con la ayuda de una lupa de mano, pero sin la necesidad del uso del microscopio, y b) las rocas afaníticas (Fig. 3C, D), en el que el reconocimiento de los componentes requiere el uso del microscopio. Esta clasificación a partir de tamaño de grano mineral, aparte de ser descriptiva, es también genética, ya que nos da información sobre el enfriamiento y emplazamiento de los magmas. Así, la textura fanerítica, asociada normalmente a rocas plutónicas, es indicativa de un

enfriamiento lento en el que se han formado pocos núcleos o gérmenes cristalinos que han podido crecer durante un largo período de tiempo, dando lugar a rocas de grano grueso. Por el contrario, la textura afanítica es consecuencia de un enfriamiento rápido del magma que implica la formación de muchos núcleos que rápidamente ocupan el espacio libre disponible, lo que limita su crecimiento y, en consecuencia, llegan a desarrollarse poco, de modo que el resultado final es la generación de rocas de grano fino, principalmente volcánicas (e hipoabisales).

La distribución del tamaño de grano en una roca ígnea puede ser homogénea o muy variable. Las principales texturas que se definen en función de la distribución del tamaño de grano son la textura granular (todos los granos son fácilmente observa-

¹ Se define cristal como un sólido resultado del ordenamiento de átomos, iones o moléculas que lo constituyen en las tres dimensiones del espacio. Este ordenamiento guarda una relación geométrica definida, aunque pueda presentar imperfecciones. Por su parte, mineral se define como una sustancia sólida e inorgánica natural que posee una composición química fija o variable dentro de unos límites estrechos y que posee un ordenamiento atómico tridimensional y sistemático. En consecuencia, todo mineral ha de ser cristal.

Fig. 2. Texturas de formación y desvitrificación del vidrio volcánico. A y C en luz polarizada plana, B y D en luz polarizada cruzada. A y B ilustran una textura esferulítica, con crecimiento radial de cristales aciculares. C y D muestran la textura perlítica formada por fracturas de contracción con disposición concéntrica.



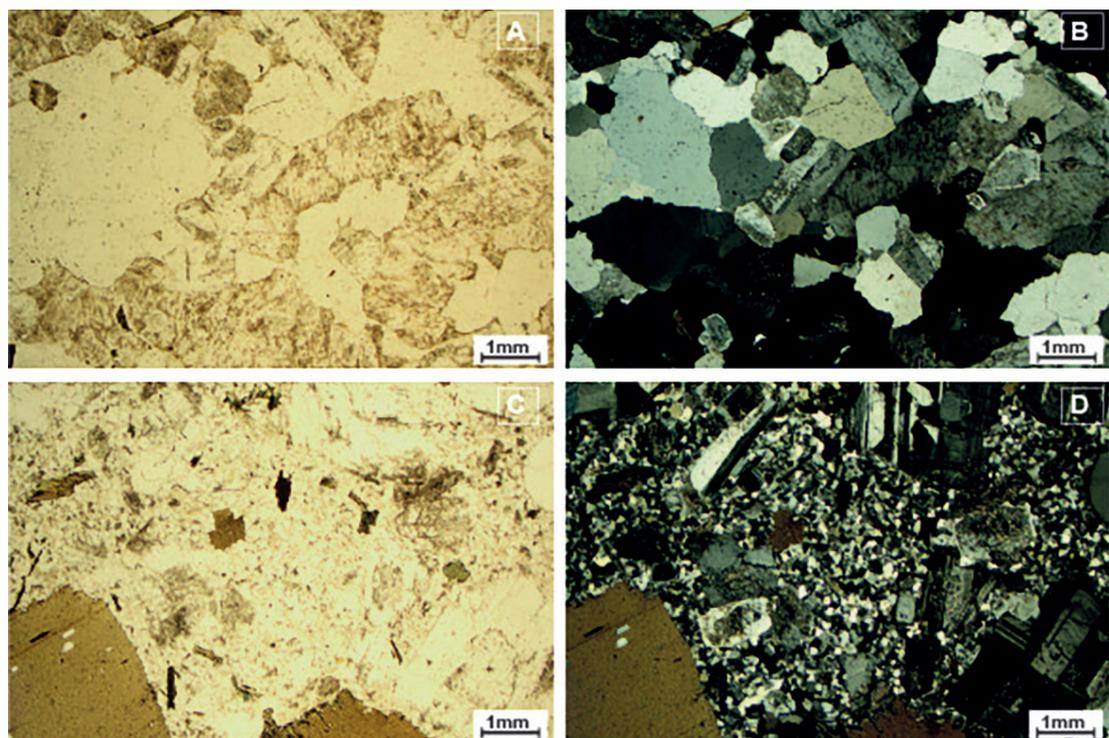
bles a simple vista) y la textura porfídica (sólo algunos de sus componentes son observables a simple vista) (Fig. 3). Hablamos de textura equigranular cuando todos los minerales que forman la roca son de tamaños parecidos (Fig. 3A, B), y textura inequigranular cuando son muy diferentes entre sí. En este último escenario se habla de distribución unimodal si hay un tamaño de grano predominante, seriada si existe una gran dispersión de tamaños y bimodal si existen dos máximos de frecuencia para dos tamaños distintos (Alfías *et al.*, 2020). La textura porfídica es un caso particular de la distribución bimodal, y está formada por unos cristales grandes

(fenocristales) inmersos en una matriz de pequeños cristales, vidrio o una combinación de ambos componentes (Fig. 3C, D)

Forma de los cristales

La forma de los cristales en rocas ígneas viene controlada por la relación entre la tasa de crecimiento del cristal, la tasa de difusión de los “nutrientes” (componentes químicos que necesitan los cristales para crecer) y la tasa de “impurezas” (componentes químicos no necesarios) en la interfase cristal-líquido. Así, los cristales que se desarrollan en condiciones de crecimiento lento, con una gran presencia

Fig. 3. Texturas relacionadas con el tamaño y distribución de los granos. A y C en luz polarizada plana, B y D en luz polarizada cruzada. A y B muestran una roca fánérita con una distribución equigranular. C y D ilustran una roca con fenocristales (cristales grandes) y matriz afanítica. La roca es inequigranular con una distribución bimodal porfídica (fenocristales y matriz).



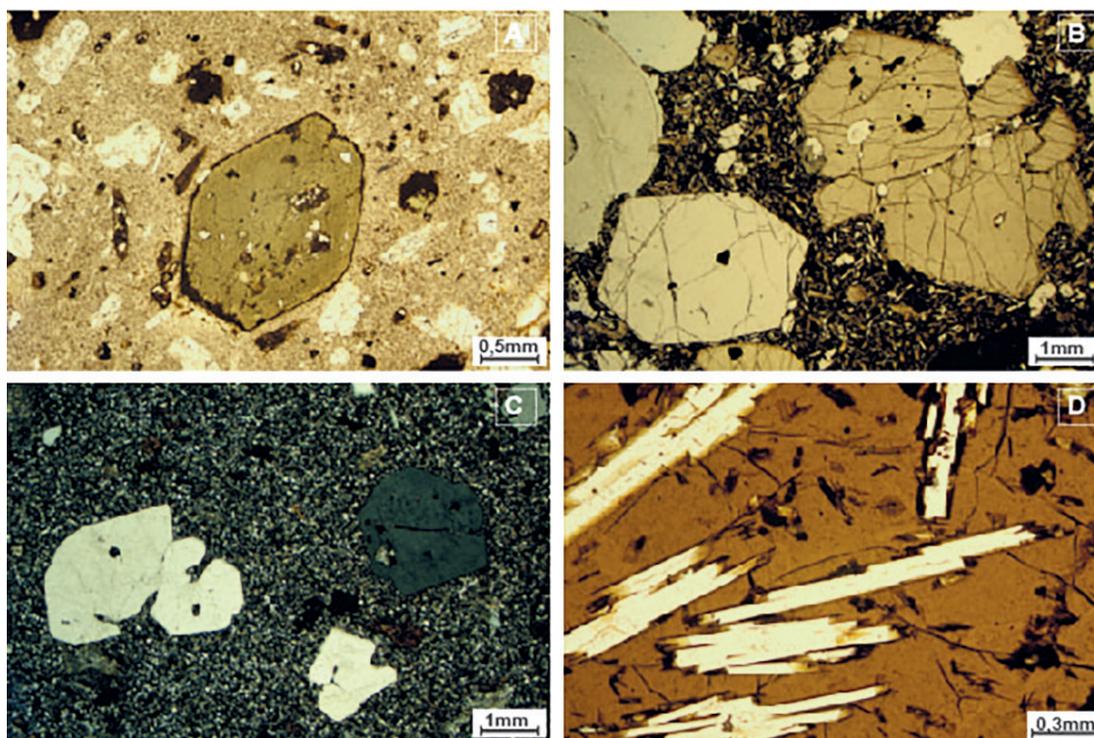


Fig. 4. Texturas relacionadas con la morfología de los cristales, el tamaño y la distribución de los granos. A, B y D en luz polarizada plana, C en luz polarizada cruzada. A y B cristales euhedrales a subhedrales de anfíbol (verde) (A), clinopiroxeno (beige-marrón) y olivino (incolore) (B). Fenocristales anhedrales de cuarzo (C). Cristales dendríticos de feldespato (D) que suelen formarse por un rápido enfriamiento del magma.

de nutrientes en el borde de grano, y con espacio para crecer, forman caras cristalinas bien formadas y reciben el nombre de cristales euhedrales o idiomórficos (Fig. 4A, B). En cambio, si el crecimiento es mucho más rápido que la tasa de reposición de la composición de la interfase, el cristal deja de crecer por acumulación de impurezas y falta de nutrientes. El resultado es la formación de cristales esqueléticos y dendríticos (Fig. 4C, D).

Según la forma de los cristales, también definimos cristales subhedrales o subidiomórficos, con alguna de las caras cristalina bien desarrolladas y cristales anhedrales, alotriomórficos o xenomórficos, con formas irregulares y sin caras cristalinas bien definidas (Fig. 4C). Mientras que los primeros se desarrollan en magmas parcialmente cristalizados con posibilidades de crecimiento restringidos, los cristales anhedrales son el producto de un enfriamiento muy rápido, de un desequilibrio con el fundido o de la falta de espacio en el sistema para adoptar un hábito idiomórfico. En este último caso, es típico observar que los minerales que cristalizan en primer lugar en el seno de un magma (los minerales que presentan las mayores temperaturas de fusión) adquieren hábitos idiomórficos o subidiomórficos, ya que, al estar rodeados de líquido magmático, no tienen impedimento para crecer ordenadamente a lo largo de todas sus caras. En cambio, los minerales de cristalización más tardía (a menor temperatura), tienen que adaptarse al espacio que dejan los minerales que han cristalizado previamente, por lo que suelen desarrollar hábitos xenomórficos o subidiomórficos.

Texturas diagnósticas y relaciones mutuas entre los componentes

Las características texturales expuestas hasta ahora permiten hacerse una primera idea del tipo de roca ígnea en cuestión. Si además le añadimos aquellas texturas que describen la disposición de

los cristales y la relación mutua entre los componentes que forman la roca, obtendremos una radiografía textural completa.

Las rocas plutónicas son holocristalinas, faneríticas, muchas veces equigranulares y con textura granular, si bien es cierto que en la naturaleza también encontramos muchas rocas plutónicas de tendencia inequigranular seriada o incluso porfídica. Aparte de estas texturas principales, existen texturas específicas de esta tipología de rocas, entre las cuales destacan las texturas de intercrecimiento y las texturas de sobrecrecimiento (Fig. 5). Las texturas de intercrecimiento describen la interpenetración de dos o más minerales como resultado de una cristalización simultánea (texturas gráficas, micrográficas, granofíricas, simplectíticas o mirmequíticas) o de desmezcla de una solución sólida (pertitas, antipertitas o exsoluciones en piroxenos). En cambio, las texturas de sobrecrecimiento se refieren a cristales que crecen alrededor de un cristal preexistente. Este cristal puede ser sobrecrecido por cristales de composición idéntica o bien de distinta composición, ya en vez de y sea de una serie isomorfa (textura de zonación) o de diferentes especies minerales (textura en corona).

Las rocas hipoabisales o subvolcánicas son en general porfídicas y con matriz afanítica. Hay otras texturas que también son típicas de esta tipología de rocas. Las más relevantes son aquellas asociadas a las relaciones de inclusiones entre minerales, si bien estas también pueden formar parte del espectro textural de rocas plutónicas y volcánicas. Estas texturas de inclusión generalmente son de tendencia inequigranular y se caracterizan por presentar cristales relativamente grandes que incluyen cristales más pequeños. Este tipo de textura se llama poiquilítica. En esta textura, el mineral poiquilítico (grande) puede haber comenzado a crecer antes, a la vez o posteriormente al mineral incluido. La presencia de estos cristales es indicativa de un cambio

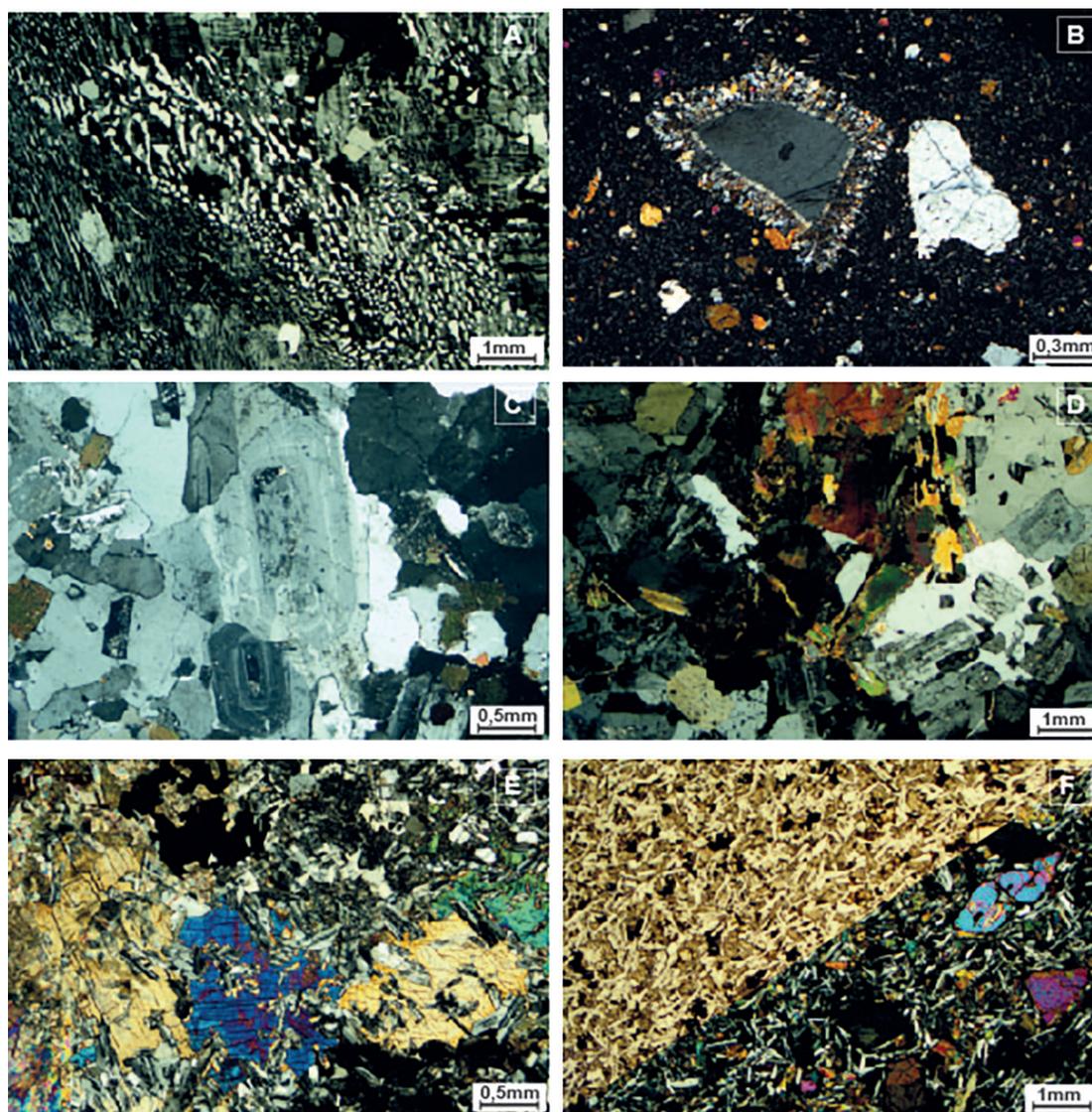


Fig. 5. Texturas derivadas de las relaciones mutuas entre componentes de las rocas ígneas asociadas con la morfología de los cristales. A-E en luz polarizada cruzada, F, diagonal izquierda en luz polarizada plana y diagonal derecha en luz polarizada cruzada. Textura gráfica (A) con intercrecimiento entre cuarzo y feldespato alcalino. Textura en corona (B). Destaca un cristal de ortopiroxeno rodeado por microcristales de piroxeno, olivino y óxidos de hierro y titanio. Dos cristales de plagioclasa con zonado composicional (C). Textura poiquilítica (D) en la que destacan grandes cristales de cuarzo incluyendo cristales de plagioclasa de menor tamaño (destacan sobre todo en la parte derecha de la fotografía). Textura ofítica (E) con cristales de clinopiroxeno (colores amarillos, azules y verdes) incluyendo microcristales de plagioclasa. Textura intergranular (F) formada por cristales prismáticos de plagioclasa con intersticios ocupados por cristales de piroxeno y óxidos de hierro y titanio. En esta imagen también se observan fenocristales de olivino que describen una textura porfídica.

importante en las condiciones de cristalización del magma, que implican una disminución de la tasa de nucleación y un aumento de la tasa de crecimiento cristalino. Una variedad de la textura poiquilítica es la textura ofítica, en la cual el mineral que incluye es clinopiroxeno y el incluido es plagioclasa. Muchas veces, el aumento del tamaño de los cristales de plagioclasa respecto al clinopiroxeno deja a este último en una situación intersticial y da lugar a una textura intergranular (Fig. 5).

Las rocas volcánicas son afaníticas y generalmente porfídicas, si bien la presencia de vidrio volcánico y vesículas permiten definir un gran número de texturas. Tal y como se ha visto anteriormente, el proceso de formación y desvitrificación del vidrio volcánico da lugar a texturas como las perlítica y

esferulítica, respectivamente. Otros ejemplos representativos de este grupo de rocas son las texturas vesicular, amigdalal, microlítica y traquítica. La textura vesicular (Fig. 6A) hace referencia a la presencia de vesículas asociadas a la exsolución y expansión de los gases que contenía el magma. Cuando las vesículas están rellenas de minerales secundarios (minerales de origen no magmático), la textura recibe el nombre de amigdalal. La textura microlítica hace referencia a la presencia de cristales aciculares de tamaños inferiores a 0,01 mm (microlitos) que se forman en la matriz de estas rocas en los estadios finales de enfriamiento y cristalización del magma en superficie. Si los microlitos crecen orientados siguiendo un flujo magmático, la textura se denomina microlítica fluidal o traquítica (Fig. 6B).

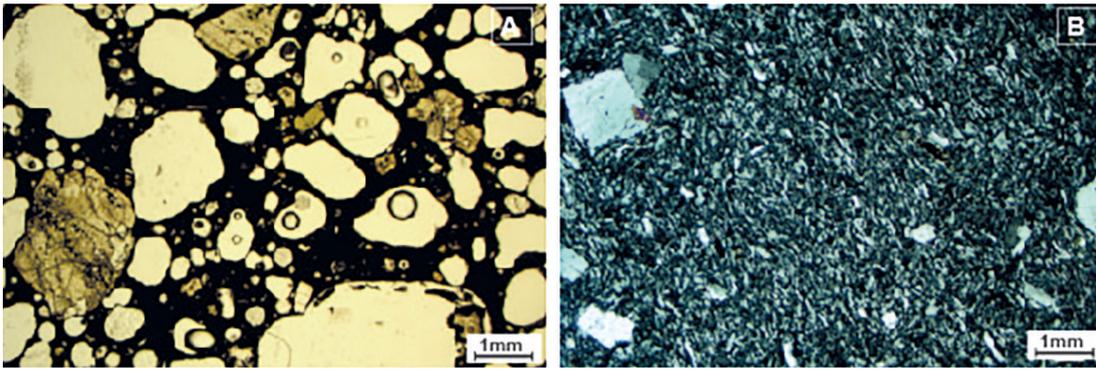


Fig. 6. Texturas diagnósticas de rocas volcánicas. (A) luz polarizada plana. Textura vesicular formada por vesículas irregulares de tamaños de hasta 3 milímetros. A parte se observan fenocristales de clinopiroxenos (beige) y algunos microfenocristales de olivino (incolore) inmersos en una matriz afanítica y formando una textura porfídica. (B) Textura microlítica fluidal o traquítica, formada por microlitos de feldespato alcalino. Destacan fenocristales de feldespato alcalino que junto con la matriz traquítica describen una textura porfídica.

Minerales formadores de las rocas ígneas

Las características texturales de las rocas ígneas nos permiten distinguir entre rocas plutónicas, hipoabisales y volcánicas. Ahora bien, la clasificación final de la roca (granito, basalto, diabasa, etc.) depende también de la composición química del magma a partir del cual se ha formado y, en su defecto, de su paragénesis mineral (conjunto de minerales asociados temporal y genéticamente). Dado que la mayoría de los magmas tienen una composición silicatada, los minerales resultantes de su enfriamiento serán minerales de composición también silicatada, con una estructura básica de silicio y oxígeno (SiO_4^{4-}) que se combina con otros elementos para dar lugar a estructuras cristalinas más o menos complejas. Los principales silicatos que forman las rocas ígneas incluyen: olivinos, piroxenos, anfíboles, micas (biotita y moscovita), feldspatos (feldespato potásico y plagioclasa) y cuarzo. La asociación de estos minerales que observamos en una roca ígnea no se

debe al azar, sino que obedece a la composición original del magma y a un orden de cristalización de acuerdo con el punto de fusión de cada uno de ellos, lo que se conoce como series de Bowen (Fig. 7) en honor al petrólogo canadiense Norman Levi Bowen que, combinando observaciones petrográficas con numerosos experimentos de fusión-cristalización de sistemas silicatados, llegó a definir el orden de cristalización de los minerales a partir de magmas silicatados. Así, aquellos minerales con puntos de fusión más altos, como olivinos, piroxenos o plagioclasas cálcicas son los que cristalizan primero, mientras que aquellos con puntos de fusión más bajos (feldespato potásico, moscovita o cuarzo), cristalizan de forma más tardía. No hay que olvidar que diferentes minerales, cuando están juntos en la misma roca, se funden a temperaturas mucho más bajas que los minerales individuales.

Durante el enfriamiento de un magma máfico, el cual es rico en magnesio (Mg), hierro (Fe) y calcio

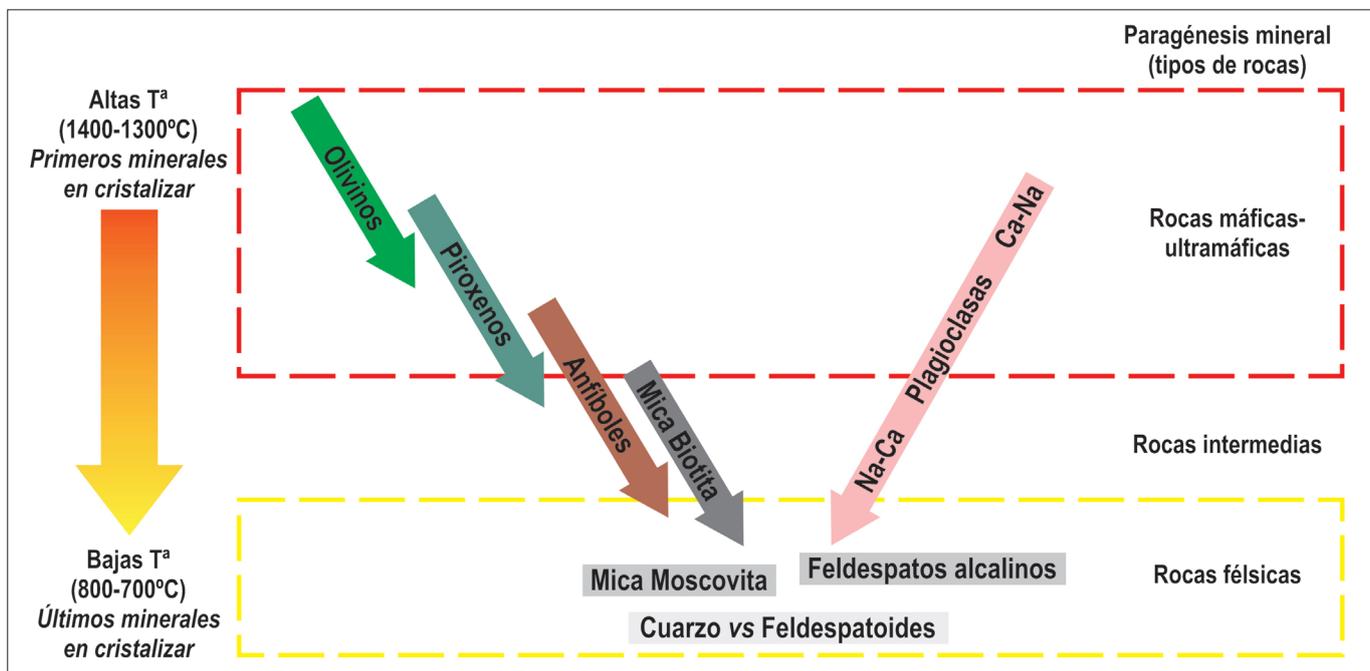


Fig. 7. La secuencia de cristalización de Bowen describe como los minerales que cristalizan cambian a medida que el magma se enfría. La secuencia se divide en dos ramas. La de la izquierda se conoce como la serie de reacción discontinua y establece que a medida que un magma basáltico se enfría la secuencia de formación de los minerales es olivino, piroxeno, anfíbol y finalmente biotita. En esta rama discontinua, cada uno de los minerales formados en cada estadio de enfriamiento presenta una composición química y una estructura cristalina distinta a las del mineral predecesor. La rama de la derecha, conocida como serie de reacción continua, muestra la cristalización de distintas plagioclasas en función de la temperatura (plagioclasas cálcicas a alta temperatura y sódicas a más baja temperatura). A diferencia de la rama anterior, la serie de reacción continua se caracteriza porque únicamente hay un cambio de composición química del mineral, pero no de estructura cristalina.

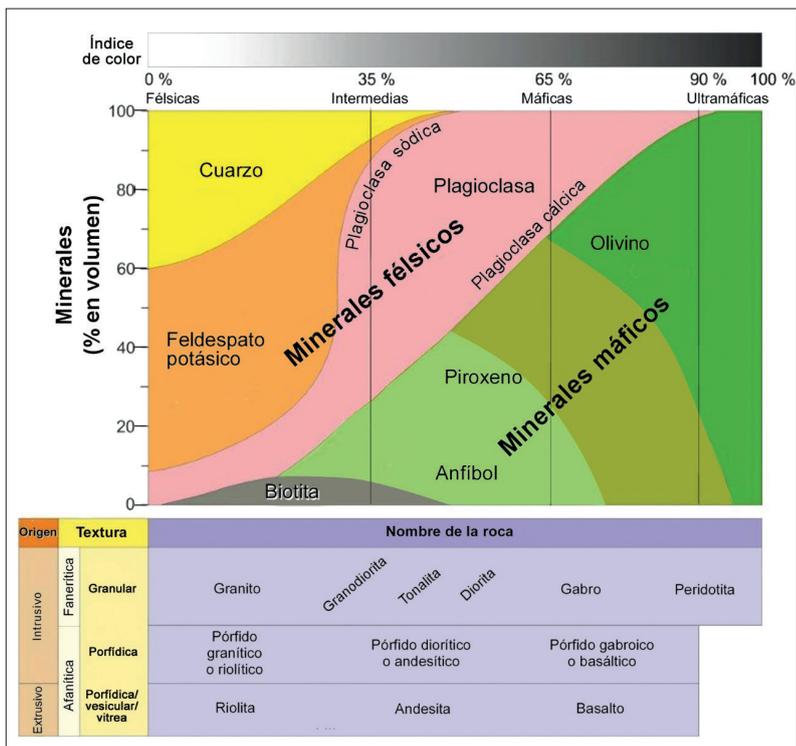


Fig. 8. Clasificación simplificada de las rocas ígneas en función de la mineralogía y del índice de color. En la parte inferior aparecen los nombres de las rocas ígneas en función de su textura y tipología (rocas intrusivas vs. extrusivas).

(Ca), se suelen formar olivinos, piroxenos y plagioclasas cálcicas. Si este magma se enfría a grandes profundidades y lentamente, la roca plutónica resultante es un gabro. Si las características texturales indican que se trata de una roca hipoabisal, la conocemos como diabasa. Si el enfriamiento y consolidación final del magma máfico tiene lugar en superficie, las rocas resultantes son los basaltos. En el otro extremo, los magmas félsicos, ricos en silicio (Si), aluminio (Al), potasio (K) y sodio (Na),

dan lugar a la formación de minerales como micas, feldespato potásico y cuarzo. La roca plutónica con esta asociación mineral es el granito, mientras que su equivalente hipoabisal es el pórfido granítico. Si el magma sufre un enfriamiento rápido y en superficie, la roca volcánica resultante se conoce como riolita (Fig. 8).

¿Cómo podemos distinguir todos estos minerales en el microscopio?

Su identificación se realiza mediante el estudio de las propiedades ópticas (por ejemplo, relieve, pleocroísmo, colores de interferencia o ángulos de extinción) así como de las características físicas (hábito, forma, exfoliación, maclas, etc.) que presentan (ver, por ejemplo, Jimenez y Velilla, 2004). Así, por ejemplo, un olivino observado en el microscopio óptico es incoloro, tiene un relieve alto, no presenta exfoliación y presenta colores de interferencia de 1er a 3er orden (de grises a amarillos y verdes). En cambio, un piroxeno es gris-marrón-verde débil con pleocroísmo, presenta dos exfoliaciones, y muestra colores de interferencia de 1er y 2º orden (de grises a azules y amarillos). Su extinción puede ser recta (ortopiroxenos) u oblicua (clinopiroxenos) y es muy común la presencia de maclas. Todas las características que permiten identificar los principales minerales formadores de rocas ígneas (olivino, piroxeno, anfíbol, biotita, feldespato potásico, plagioclasa, moscovita y cuarzo) se recogen en la guía dicotómica de la figura 9.

Existen numerosos manuales que tratan sobre el fundamento teórico de la microscopía óptica, así como de las propiedades ópticas de los minerales (Ehlers, 1987; Deer *et al.*, 1992; Klein y Philpotts, 2012; MacKenzie y Adams, 1997; Melgarejo, 1997; Perkins y Henke, 2002). Además, existen varias pá-

LUZ POLARIZADA PLANA	COLOR	Incoloro (limpio)		Incoloro		Incoloro (puede tener aspecto turbio por alteración)		Incoloro		Gris-marrón-verde	Marrón-verde						
		No		2 juegos, difíciles de ver al microscopio debido al bajo relieve		2 juegos		1 juego		Pleocroísmo débil	Pleocroísmo intenso						
LUZ POLARIZADA CRUZADA	EXFOLIACIÓN	No		2 juegos, difíciles de ver al microscopio debido al bajo relieve		2 juegos		1 juego		2 juegos 90°	2 juegos 60° - 120°	1 juego					
	COLORES DE INTERFERENCIA	Gris y blancos de 1er orden	Colores final de 2º orden y comienzo del 3º	Gris de 1er orden		Gris o blanco de 1er orden	Colores muy vivos de 2º orden		Colores de 1er y 2º orden	Colores de 2º a tercer orden	Colores de 1er a 3er orden						
	EXTINCIÓN	Recta		Recta (5-6º máximo)		Oblicua		Recta		Recta-ortopiroxeno Oblicua-clinopiroxeno	Oblicua	Recta					
MACLADO	No identificable ópticamente	Muy raro	Común (macla de Carlsbad)		Común (macla polisintética)		Muy raro		Muy común	Ocasional	Muy raro						
		↓		↓		↓		↓		↓		↓					
		CUARZO		OLIVINO		FELDESPATO POTÁSICO		PLAGIOCLASA		MOSCOVITA		PIROXENO		ANFÍBOL		BIOTITA	

Fig. 9. Guía dicotómica de los principales minerales formadores de las rocas ígneas. En esta guía se incluyen las principales propiedades ópticas y físicas de cuarzo, olivino, feldespato alcalino, plagioclasa, moscovita, piroxeno, anfíbol y biotita.

ginas webs sobre bases de datos de minerales como son <http://www.mindat.org> o <http://webmineral.com>. Hay que destacar también el atlas de mineralogía óptica de la Universidad del País Vasco <http://www.ehu.es/mineralogiaoptica/>, y el atlas de mineralogía de la Universidad de Granada <https://www.ugr.es/~velilla/> en los que se incluyen la descripción de las propiedades ópticas y características físicas de un gran número de minerales, todos ellos ilustrados con microfotografías. Se remite al lector a la consulta de estos recursos para un mayor conocimiento sobre mineralogía óptica.

RECURSOS EN LA WEB SOBRE ROCAS ÍGNEAS EN EL MICROSCOPIO

En este apartado se presentan algunas páginas web sobre el reconocimiento de rocas ígneas al microscopio a través de sus texturas y composición mineral. Existe un número considerable de páginas web que dedican parte de su contenido a facilitar el aprendizaje de la Petrología Ígnea, pero siendo conscientes que con el paso del tiempo muchos enlaces dejan de funcionar, en este apartado se recopilan únicamente algunos de los recursos que dependen o se relacionan con instituciones que por su notoriedad avalan que seguirán disponibles en la red durante un largo período de tiempo.

<https://petroignea.wordpress.com/>

Se trata de un atlas de rocas ígneas realizado por el Grupo de Petrología Ígnea del Departamento de Petrología y Geoquímica de la Universidad Complutense de Madrid. Este atlas se ocupa de la identificación de las texturas de las rocas ígneas, su composición mineral, sus características estructurales, así como sus formas de yacimiento. Todos los contenidos son muy completos y se complementan con imágenes de afloramientos, de muestras de mano y de microscopio de muy buena calidad. Se trata de una herramienta muy interesante para los docentes y estudiantes de grado de Geología y enseñanzas afines, así como de bachillerato.

<https://www.alexstrekeisen.it>

Esta página web es la única que no se asocia con ninguna institución (universidad, centro de investigación, etc.), pero dada su calidad didáctica y la cantidad de material fotográfico que contiene, se ha incluido en este apartado. Se trata de una web creada por el Dr. Alessandro Da Mommio que es ideal para estudiantes y profesorado de Geología tanto a nivel de secundaria y bachillerato como universitario. En esta web se incluyen fotografías de microscopio de todos los tipos de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas). En el caso de rocas magmáticas se centra en las plutónicas y volcánicas. Cada página consta de dos partes, una descriptiva en la que se realiza una explicación exhaustiva del mineral, textura o roca que se ha escogido, y una segunda parte, visual, con fotografías de alta resolución acompañadas de un breve pie de figura explicativo. El uso de

todas estas fotografías para fines educativos y de divulgación es libre con previo permiso del autor (alexdm83@libero.it).

<http://www.earth.ox.ac.uk/~oesis/micro/index.html>

La Universidad de Oxford, a través del Oxford Earth Sciences Image Store, tiene a disposición para la comunidad educativa una colección de fotografías digitalizadas de rocas en muestra de mano y microscopio, así como de afloramientos. Para ello cuentan con distintas colecciones. Aquí destacamos la colección "Rocks Under the Microscope" la cual incluye imágenes de microscopio de todo tipo de rocas. Aunque el banco de imágenes no es muy extenso (39 fotografías, de las cuales 17 son rocas ígneas), la calidad de las fotografías, así como los pies de figura que las acompañan, hacen de esta colección un buen recurso para la docencia.

<https://www.virtualmicroscope.org>

El Microscopio Virtual (VM) para Ciencias de la Tierra es un recurso educativo abierto creado por la Open University que tiene como objetivo dar acceso virtual a las colecciones de rocas y meteoritos que se encuentran actualmente en museos, universidades y otras instituciones de todo el mundo. Se trata de una herramienta interactiva óptima para explorar y examinar los minerales y las características texturales de las rocas a escala de microscopio. A diferencia de otras webs con contenido petrológico, el Microscopio Virtual permite tener una experiencia inmersiva en la visualización de las rocas a escala de microscopio.

A diferencia de las páginas web, las redes sociales como Instagram o Twitter no contienen un gran número de cuentas específicas con material divulgativo sobre rocas ígneas (así como sedimentarias y metamórficas) vistas al microscopio. En Instagram, que es sin duda una de las redes sociales con un mayor nivel de interacción de los usuarios con los contenidos, destacan las cuentas de @alexstrekeisen, @microrockscopia (más enfocada a la microfotografía como arte), así como la iniciativa #thinsectionthursday que cuenta con más de 1900 publicaciones sobre rocas y minerales vistos en el microscopio petrográfico. A través de esta entrada los usuarios pueden llegar a distintas cuentas que, si bien no están enfocadas a difundir de forma exclusiva petrografía de rocas ígneas, sí que cuentan con un número importante de posts sobre esta temática. Un ejemplo es @Ohmaggamia en la que destaca una serie de publicaciones dedicadas a cómo identificar los principales minerales formadores de rocas ígneas. En el caso de Twitter, una de las redes de microblogging más populares en la actualidad, hay numerosos perfiles que dedican sus tweets a la geología, destacando a nivel estatal @geologoenapuros, @geodadivulga, @Niasch, @PetroMet, @lauraMParro, @batidivulga, @rocafilosofal, o @GeologicalMan, entre otros muchos. Pero las cuentas de @alexstrekeisen y @micRockscopia son las que dedican sus tweets a mostrar las rocas vistas al microscopio petrográfico. Al igual que en Instagram, también existe la iniciativa #thinsectionthursday.

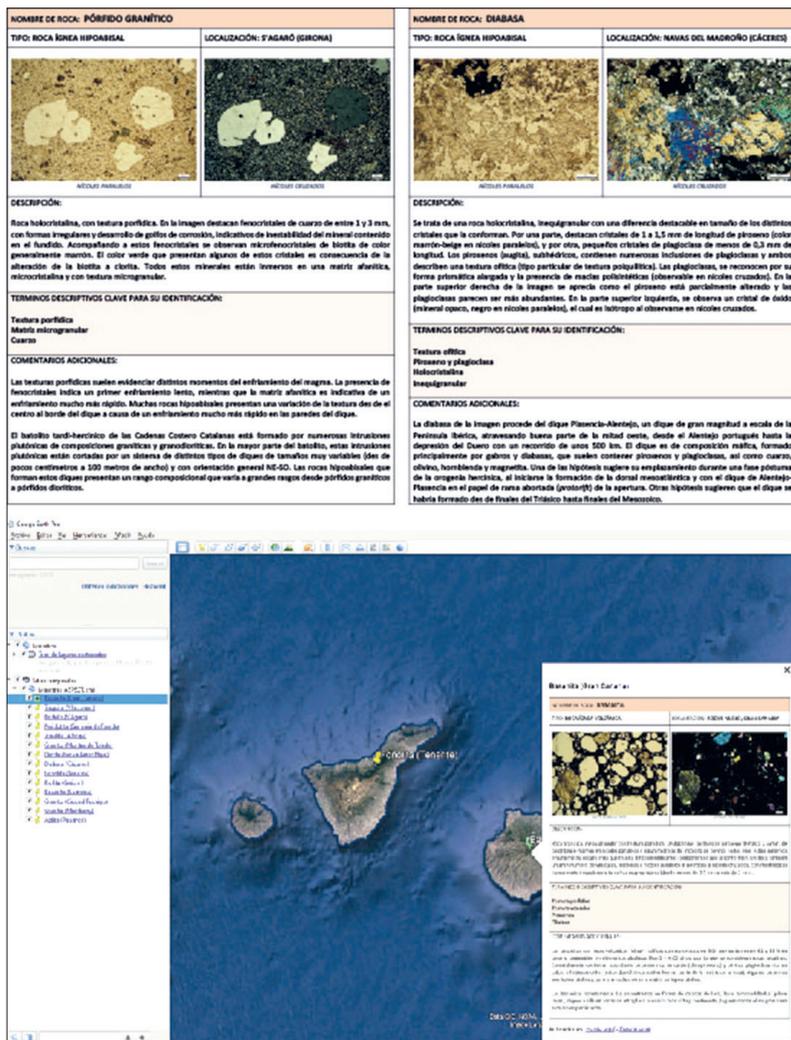


Fig. 10. Ejemplos de fichas descriptivas de rocas ígneas vistas al microscopio petrográfico. Además, se ilustra la visualización del archivo kmz, asociado a través de Google Earth.

RECURSO DIDÁCTICO

La herramienta didáctica que se ha desarrollado en este trabajo consiste en un catálogo virtual de imágenes de microscopio de rocas ígneas que afloran en distintas localizaciones españolas. Actualmente el catálogo contiene 14 fichas de rocas vistas al microscopio petrográfico. Todas las microfotografías se han realizado a partir de las colecciones de láminas delgadas del Departament de Mineralogia, Petrologia i Geologia Aplicada de la Universitat de Barcelona, así como de colecciones particulares de los autores de este trabajo. Cada ficha contiene dos fotografías de microscopio (una con luz polarizada plana y otra con luz polarizada cruzada), así como una descripción exhaustiva de las texturas y minerales que se muestran (Fig. 10). Además, se incluyen entre dos y cuatro palabras clave para su identificación y un apartado de información adicional. Todas estas fichas, disponibles en el repositorio <http://hdl.handle.net/2445/179947>, forman parte de un archivo .kmz (Keyhole Markup Zipped) que puede visualizarse a través de Google Earth. Esta nueva herramienta virtual tiene por objetivo enseñar petrografía de rocas ígneas de un modo ameno y activo, a la vez que fortalecer la adquisición de habilidades científicas y tecnológicas entre el alumnado.

Con el fin de ofrecer un catálogo de rocas ígneas completo que comprenda todo el territorio español, el catálogo se irá ampliando progresivamente. La ampliación de las fichas pasa por tejer una red de colaboración entre instituciones, profesorado y alumnado de Ciencias de la Tierra. Para ello, se habilita un formulario de contacto disponible en el mismo repositorio digital de la Universitat de Barcelona. Todas las actualizaciones se incorporarán periódicamente en dicho repositorio.

Aprendizaje activo con Google Earth

El avance tecnológico permite realizar una enseñanza basada en nuevas estrategias y técnicas a través del uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Por ello, el uso de Google Earth es un recurso motivador para el aprendizaje de conocimientos e información geográfica en diversas disciplinas, alejando la metodología tradicional para fomentar nuevas destrezas en el alumnado. Google Earth es una herramienta gratuita que combina imágenes de satélite en 2 y 3D, mapas y una base de datos con información geográfica muy completa, que permite tener acceso a la información de forma sencilla, rápida y a diversas escalas. Su conectividad con la realidad lo convierte en una herramienta fundamental e innovadora para el tratamiento y el conocimiento de la información.

Google Earth, como Google Maps y Google Maps para móviles puede abrir todos los archivos que tengan la extensión: .kml (Keyhole Markup Language) o .kmz (Keyhole Markup Zipped). La diferencia está en que un KML es un formato de archivo que se utiliza para mostrar datos geográficos y utiliza una estructura basada en etiquetas con atributos y elementos anidados y está basado en el estándar XML. Sin embargo, un archivo KMZ está formado por un archivo KML principal y cero o más archivos complementarios empaquetados en formato ZIP (comprimido) formando una única unidad denominada fichero.

El fichero KMZ creado para el catálogo de rocas ígneas se ejecuta directamente y abre Google Earth. Para ello, es necesaria la instalación en el PC del software de Google Earth: (<https://www.google.es/intl/es/earth/download/ge/agree.html>) (Fig. 10).

CONSIDERACIONES FINALES

Las rocas ígneas son los productos naturales de la cristalización, enfriamiento y solidificación de los magmas originados en el manto o en la corteza inferior. Además, son las fuentes originales y primarias de muchos de los componentes que forman las rocas sedimentarias y metamórficas. Por último, el magmatismo que surge en las cordilleras montañosas de los fondos oceánicos, conocidas como dorsales, es un proceso protagonista en el origen de la vida en el planeta. Su estudio, a través de la petrología ígnea, es crucial en la investigación de los procesos internos y dinámica de nuestro planeta. En este contexto, la descripción y clasificación de las rocas magmáticas o ígneas a partir de criterios texturales y mineralógicos (petrografía) es el primer paso a seguir en cualquier estudio petrológico. Así

mismo, la petrología actual resulta tener una aplicación mucho más allá del conocimiento de los materiales terrestres. Con el advenimiento de las misiones espaciales durante las últimas cinco décadas, la petrología está desempeñando un papel intenso para comprender y explorar todo el Sistema Solar.

A pesar de que en muchos centros de secundaria y bachillerato no disponen de microscopio petrográfico para impartir clases prácticas de descripción e identificación de rocas, merece la pena transmitir al alumnado el aspecto de las rocas al microscopio, ya que abre un nuevo escenario para el aprendizaje de los procesos que han formado las rocas más allá de las observaciones (muchas veces limitadas) e interpretaciones que se realizan a escala macroscópica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es producto de la colaboración entre el grupo de innovación docente consolidado GRIMS (GINDOC-UB/137) de la Universitat de Barcelona, así como del grupo de investigación Geología de Terrenos Volcánicos (GEOVOL) del Instituto de Estudios Ambientales y Recursos Naturales (i-UNAT) de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Los autores agradecen a Pep Agulló por la realización de la figura 8. Los autores agradecen las revisiones de Pura Alfonso y Guillem Gisbert, las cuales han mejorado el resultado final de este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

Alías, G., Aulinas M., Cantarero, I. y 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.

Aulinas, M., Gisbert, G. y Ortuño, M. (2018). *La Tierra, un planeta inquieto*. Ed. Universitat Barcelona, 292 p.

Castro, A. (2015). *Petrografía de rocas ígneas y metamórficas*. Ed. Paraninfo, 276 p.

Deer, W.A., Howie, R.A. y Zussman, J. (1992). *An Introduction to the rock-forming minerals*. Ed. Longman (2ª edición), 696 p.

Donaire, T. y Pascual, E. (2012). Propiedades básicas de petrografía óptica aplicadas a la clasificación y estudio de las rocas ígneas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20.2, 188-197.

Ehlers, E.G. (1987). *Optical Mineralogy*. Ed. Blackwell Scientific, 286 p.

Franco, M.P. y Gonzalo, J.C. (2000). Taller de Petrología: Enseñanza de la petrología con el microscopio petrográfico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8.1, 38-47.

Jimenez, J. y Velilla, N. (2004). Optica Mineral: Una herramienta informática para el estudio de los minerales en el microscopio petrográfico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12.1, 57-61.

Klein, C. y Philpotts, A.R. (2012). *Earth materials. Introduction to mineralogy and petrology*. Ed. Cambridge University Press, 533 p.

Mackenzie, W.S. y Adams, A.E. (1997). *Atlas en color de rocas y minerales en lámina delgada*. Ed. Masson, 215 p.

Mackenzie, W.S., Donaldson, C.H. y Guilford, C. (1996). *Atlas de rocas ígneas y sus texturas*. Ed. Masson, 160 p.

Melgarejo, J.C. (coord) (1997). *Atles d'associacions minerals en làmina prima*. Ed. EUB, Edicions Universitat de Barcelona: Fundació Folch, 1706 p.

Perkins, D., Henke, K.R. y Pozo Rodríguez, M. (2002). *Minerales en lámina delgada*. Ed. Prentice Hall, 139 p.

Vernon, R.H. (2004). *A practical guide to rock microstructure*. Ed. Cambridge University Press, 594 p. ■

Este artículo fue recibido el día 1 de diciembre de 2020 y aceptado definitivamente para su publicación el 3 de marzo de 2021.