

Los materiales de la Tierra

The Earth Materials

GABRIEL R. ALMODÓVAR

Departamento de Geología, Universidad de Huelva. Avda. Tres de Marzo, s/n, Campus de El Carmen, 21071 – Huelva.
almodovar@uhu.es

Resumen En este artículo se sintetizan los aspectos más importantes relacionados con los materiales terrestres, aquellos que deben ser tenidos en cuenta en una enseñanza básica de las Ciencias de la Tierra, y que cada ciudadano debe de conocer. Se abordan algunas cuestiones esenciales sobre la naturaleza de los minerales y de las rocas, así como de los métodos y técnicas que se emplean en su estudio, de los procesos geológicos que los originan, transforman o destruyen, de su significado y variación a través del tiempo geológico, y de su utilización social y económica.

Palabras clave: Materiales terrestres, minerales, rocas, procesos geológicos.

Abstract *This article summarizes the most important aspects of Earth materials which must be taken into account when teaching Earth Sciences at a basic level, and which every citizen should be familiar with. It addresses some essential questions related to the nature of minerals and rocks, as well as the methods and techniques used to study them; the geological processes that originate, transform or destroy them; their meaning and the way they change on a geologic time scale; and their social and economic use.*

Keywords: *Earth materials, minerals, rocks, geological processes.*

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo se enmarca dentro de los planteados en el documento de “Alfabetización en Ciencias de la Tierra” (Pedrinaci, 2012), desarrollando la “idea tres” que se dedica a los materiales de la Tierra. En concreto, se trata de poner de manifiesto los aspectos básicos más importantes referidos a los materiales terrestres sólidos: ¿en qué consisten?, ¿cómo se estudian?, ¿cómo se originan y transforman?, ¿cuál es su implicación en la historia de la Tierra?, y ¿qué utilidad social tienen?

Minerales, rocas, suelos y sedimentos, son los constituyentes sólidos que junto a gases, como el aire, líquidos, como el agua, y seres vivos, conforman el planeta Tierra. Las interacciones que se producen entre todos ellos, sólidos, líquidos, gases y organismos vivos, por efecto de las energías interna y externa del planeta, son la base del complejo sistema terrestre y el origen de la diversidad y naturaleza de los procesos geológicos.

NATURALEZA DE LOS MATERIALES TERRESTRES

Los minerales consisten en elementos o compuestos químicos naturales, y son los constituyentes básicos de los materiales terrestres sólidos.

La agregación de uno o varios tipos de minerales, constituye lo que denominamos roca, que a veces también contiene restos fósiles. Los suelos y sedimentos son formaciones superficiales recientes, constituidas por agregados, frecuentemente sin consolidar, de minerales, de fragmentos de rocas y de restos de organismos. Con el tiempo tienden a consolidarse y/o cementarse, perdiendo su condición original y adquiriendo la de rocas.

Una definición más formal de **mineral**, pone de manifiesto que es un elemento o compuesto químico, normalmente cristalino, que se ha formado como resultado de un proceso geológico (Nickel, 1995). Se caracteriza por una composición química y una estructura interna ordenada que le confieren unas propiedades particulares, y a partir de las cuales puede ser identificado. Esta definición introduce una cuestión básica al relacionar el concepto de mineral con la geología y los procesos geológicos. A los minerales los podemos agrupar en función de composiciones y estructuras similares, dando lugar a las clasificaciones minerales, en las que se organizan por clases definidas por la composición del anión dominante, que a su vez se subdividen en subclases y grupos en función, sobre todo, de la estructura cristalina. Las clasificaciones más usadas son las de Dana (1837) y Strunz (1941), que se revisan y actualizan de forma continua siguiendo las directrices de la “Internacional Mineralogical

Association” (IMA), y que se pueden consultar a través de internet, accediendo a bases de datos como: Mindat.org, Webmineral.com y Athena mineralogy. Dichas clasificaciones son las que adoptan la mayoría de los manuales de mineralogía (Klein y Hurlbut, 1996, 1997; Hibbard y Hibbard, 2002). Se conocen 4782 especies minerales diferentes (IMA, 2013), de las cuales aproximadamente 29 % son silicatos, 18 % fosfatos, 15 % sulfuros y sulfosales, 14 % óxidos e hidróxidos, 8 % sulfatos, molibdatos y wolframatos, 5 % carbonatos y nitratos, 4 % de haluros, 3 % boratos, 3 % elementos nativos y 1 % compuestos orgánicos (Fig. 1) (Klein y Philpotts, 2013). Sin embargo, no todos los minerales se encuentran con la misma frecuencia en la corteza terrestre, sino que hay algunos muy comunes y abundantes, que son los constituyentes principales de la rocas (Deer et al., 1992), otros escasos, que a veces se hallan concentrados formando mineralizaciones, o yacimientos minerales cuando son de interés económico, y por último una mayoría de minerales que son tan escasos que sólo han sido citados en una o varias localidades muy concretas.

La composición química media de la corteza continental, que es la parte de nuestro planeta más accesible, es un buen indicativo de la composición más común de los minerales y rocas que conforman el substrato que pisamos. La composición química media de la corteza continental superior (Wedepohl, 1995) está constituida casi en un 99.5 % por sólo diez elementos, que son: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, potasio, sodio, magnesio, titanio y carbono (Fig. 2). La mayor parte de estos elementos, combinados entre sí, se encuentran en gran medida en los silicatos, y en las rocas silicatadas, y en mucha menor medida en carbonatos y óxidos. Estos tres grupos minerales son los constituyentes principales de las rocas de la corteza terrestre.

Las **rocas** son los materiales terrestres por excelencia, y son las que construyen el paisaje geológico. Se agrupan tradicionalmente en tres categorías en función de los procesos geológicos que las originaron: magmáticas, metamórficas y sedimentarias. La abundancia de cada una de ellas es variable en función de la zona de la corteza terrestre que se considere. Así en las estimaciones realizadas para la corteza continental superior (hasta 20 kms de profundidad) por Wedepohl (1995), se estima un 56 % de rocas magmáticas, un 30 % de metamórficas y un 14 % de sedimentarias. Estos porcentajes varían si se considera solo la superficie terrestre, lo que constituye el paisaje geológico, ya que las rocas sedimentarias y sedimentos cubren alrededor del 75 % del planeta.

La clasificación de las rocas dentro de cada categoría, puede llegar a ser muy compleja (Le Maitre et al., 1989; Le Bas y Streckeisen, 1991; Jerram y Petford, 2011; Fry, 1991; Tucker, 2011; Arribas et al., 2007-2013), aunque en los tres casos se utilizan similares criterios de caracterización, como son las condiciones físico-químicas de formación, la composición mineralógica y química, y sus características geométricas internas y externas, a gran y pequeña escala (estructura y textura). Estos criterios a su vez están interrelacionados, ya que las condiciones de formación suelen afectar a la

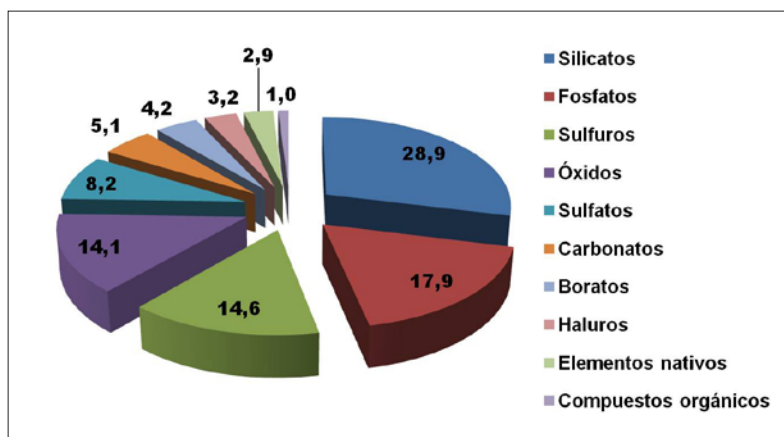
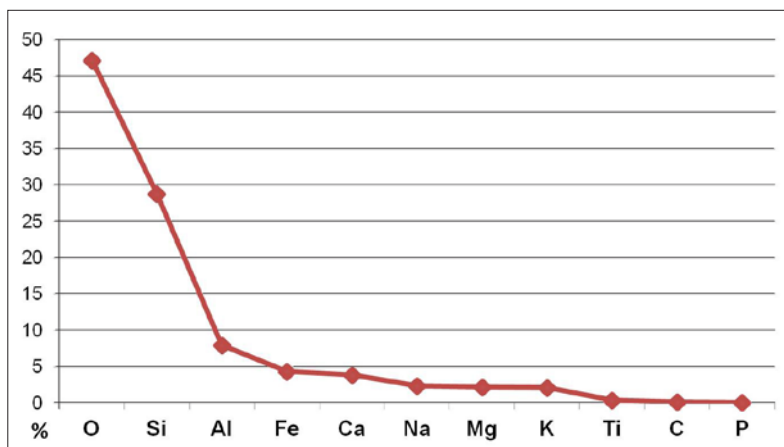


Fig. 1. Distribución porcentual entre las clases minerales de las casi 4.800 especies conocidas, realizada a partir de datos de IMA (2013).

composición mineralógica y/o a las características estructurales y texturales. Para el reconocimiento de una roca es tan importante la identificación mineral como la identificación textural y/o estructural. Hay diversas rocas que presentan una composición prácticamente idéntica y se diferencian únicamente en sus características texturales, que a su vez nos informan sobre diferencias en las condiciones de formación. El caso de las rocas constituidas por cuarzo, feldespatos y micas, es el ejemplo más claro, ya que con esa composición hay rocas muy diversas: magmáticas (granitos, riolitas, ...), con texturas granudas equigranulares o porfídicas, faneríticas o afaníticas; metamórficas (esquistos, gneises,...), con texturas de orientación, deformación mineral, superficies de esquistosidad y bandeado; y sedimentarias (brechas, conglomerados, areniscas,...), con estructuras de granoclasificación, estratificación, laminación. En la Figura 3 se recoge diversos tipos de rocas silicatadas, esencialmente cuarzo-feldespáticas, que tienen composiciones similares pero que difieren en cuanto a sus condiciones de formación y a las características texturales que presentan.

Múltiples ejemplos y recursos de tipos de rocas con sus características mineralógicas y texturales se encuentran en internet y en muchas publicaciones divulgativas. Algunas referencias más avanzadas son de mayor interés y utilidad en la búsqueda de información y de recursos para el aula (p. ej.: Arribas et al., 2007-2013; MacKenzie et al. 1982; Adams et al. 1997; Yardley et al. 1997; Schmid et al., 2007).

Fig. 2. Composición elemental de la corteza continental terrestre, a partir de datos de Wedepohl (1995). Los once elementos químicos reseñados representan el 99.5 % del total. El gráfico ilustra sobre los contenidos relativos en los diferentes elementos químicos.



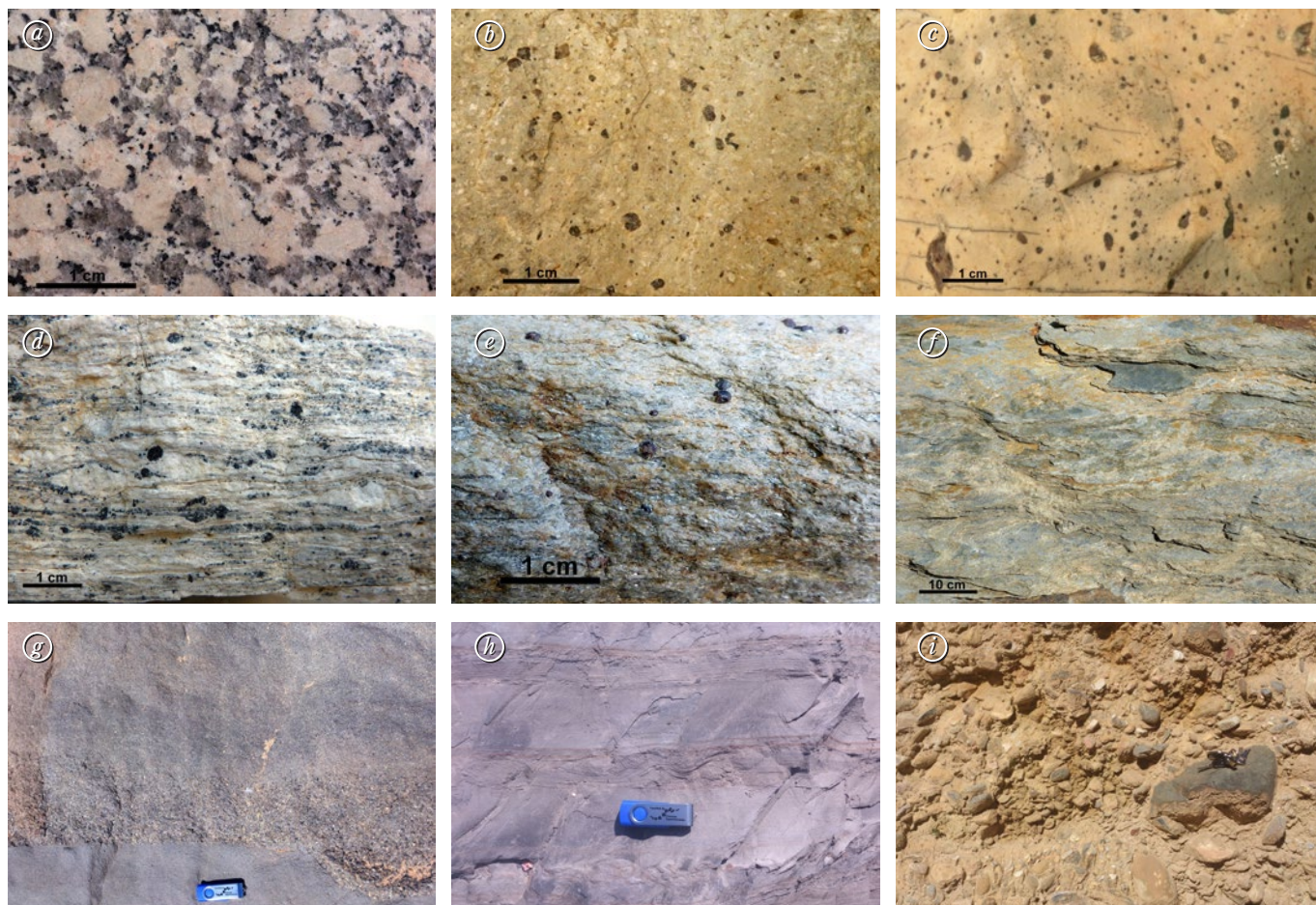


Fig. 3. Variaciones en las características texturales de algunas rocas silicatadas: a) granito rosa, constituido por feldespato, cuarzo y biotita (Galicia); b) riolita porfídica con fenocristales de cuarzo y feldespato en una matriz microcristalina (Nerva, Huelva); c) riolita afanítica con vacuolas (Aznalcollar, Sevilla); d) gneis bandeado con turmalina, constituido por feldespato y cuarzo como mayoritarios (Sierra Nevada, Granada) (Foto de N. Velilla); e) micasquito granatífero, constituido esencialmente por cuarzo, moscovita y feldespato (Sierra Nevada, Granada) (Foto de N. Velilla); f) micasquito grafitoso, constituido por moscovita, cuarzo y feldespato (Sierra Nevada, Granada) (Foto de N. Velilla); g) arenisca y microconglomerado con granoclasificación, y contacto erosivo entre ambos, constituidos por fragmentos de rocas, cuarzo, feldespato y micas (Gibraleón, Huelva); h) arenisca con bandeado sedimentario y laminaciones horizontales y cruzadas, constituida por cuarzo y feldespato (Huelva); i) conglomerado constituido por fragmentos de rocas y de cuarzo en una matriz arcillo-arenosa (Sacromonte, Granada).

MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA EL ESTUDIO DE LOS MATERIALES TERRESTRES

No se pretende abordar aquí una descripción detallada de los métodos y técnicas de estudio de los minerales y de las rocas, de ello se ocupan dos disciplinas geológicas como son la Mineralogía y la Petrología, respectivamente. Pero sí es interesante recoger de forma sucinta cuáles son los principales objetivos del estudio de los minerales y de las rocas, ¿para qué se estudian?, haciendo referencia a algunos de los métodos y técnicas de análisis que más se utilizan.

Los materiales terrestres se estudian desde muy diversos puntos de vista, y desde cada uno de ellos con unos objetivos particulares, que se pueden sintetizar en tres grandes categorías, los que tienen

como objetivo la identificación y caracterización, los dirigidos a conocer su significado geológico y los relacionados con su posible utilización industrial y económica.

La perspectiva más básica es la identificación, para la que se siguen desde métodos simples de reconocimiento de visu, pasando por los métodos y técnicas de rutina en el análisis mineralógico y petrográfico (Klein y Hurlbut, 1996; Hibbard, 1995; Klein y Philpotts, 2013), tales como los de microscopía óptica y electrónica, de difracción de rayos X y de análisis químico, y hasta las técnicas más sofisticadas de análisis, que siguen avanzando al mismo ritmo que lo hace el avance tecnológico, como por ejemplo las relacionadas con el campo emergente de la nanotecnología en Geología. Merece la pena también hacer mención a los métodos y técnicas indirectas y a distancia, que permiten explorar las características de los materiales del interior de la Tierra (p. ej.: geofísica sísmica), y la composición de planetas y cuerpos estelares alejados de la Tierra (p. ej.: espectroscopía astronómica).

En la revista de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra se pueden consultar innumerables propuestas didácticas sobre el estudio de los minerales y de las rocas, como p. ej.: Gallegos (1997); Nogués (2002); Jiménez Millán y Velilla (2004); Donaire y Pascual (2012); Benavente et al. (2012).

En algunos casos especiales, como ocurre con los nuevos minerales, la identificación y/o caracterización es el objetivo final, pero la mayoría de las veces este es un objetivo intermedio y necesario

para perseguir otros objetivos de carácter geológico o utilitario.

La interpretación genética de los minerales y de las rocas constituye la base donde se sustenta la Geología, y su desarrollo pasado y futuro se apoya en la aplicación de principios fundamentales como los de actualismo, uniformismo, superposición de estratos, etc., junto con la utilización de modelos teóricos o experimentales, en la aplicación de métodos y técnicas muy variadas de geotermometría, geobarometría, geocronología, utilización de trazadores geoquímicos, etc. De esa manera, de una roca se pueden llegar a conocer los procesos geológicos que la formaron, las condiciones físico-químicas de su formación y su evolución en el tiempo, el periodo, o los periodos de tiempo en que se formó y modificó, la procedencia de sus componentes, las relaciones espacio-temporales y genéticas con otras rocas o asociaciones minerales, así como su significado en el contexto geológico local y regional (Bastida, 1999).

Desde un punto de vista económico el estudio de los minerales y de las rocas se dirige a dos grandes objetivos que utilizan métodos y técnicas básicamente diferentes, uno es conocer ¿para qué y cómo pueden ser útiles? y otro ¿cómo se pueden localizar y explotar? Los minerales y las rocas se utilizan por sus propiedades físicas y/o químicas, o para extraer, a partir de ellos, un número muy diverso de sustancias de interés comercial. Por tanto, desde este punto de vista, su estudio se centra por un lado en conocer sus propiedades y verificar mediante ensayos sus aplicaciones, y por otro en encontrar la manera más fácil y sostenible de conseguir la separación y concentración de los minerales, y la obtención de las sustancias comerciales. Los métodos y técnicas que se emplean no son únicamente los de la mineralogía y petrología, sino también los de disciplinas como ciencias de los materiales y metalurgia.

La localización de minerales y rocas para su explotación económica, cae de lleno en los objetivos de la exploración geológico minera, que utiliza los métodos y técnicas de todas las disciplinas geológicas, y de otras a caballo con otras ciencias o disciplinas, como son la prospección geofísica y geoquímica, y la realización de sondeos mecánicos. El objetivo no es sólo la localización de las sustancias minerales, sino también la evaluación económica, en cuanto a contenidos y volumen, o leyes y reservas, y a un elevado número de factores de tipo geológico, geográfico, industrial, ambiental, económico, político, etc., que conjuntamente hacen que el proyecto de exploración se convierta, o no, en proyecto de explotación minera.

PROCESOS GEOLÓGICOS Y MATERIALES TERRESTRES

“Los materiales de la Tierra se originan y modifican continuamente” es el título de la idea clave nº 3 del documento de “Alfabetización en Ciencias de la Tierra” (Pedrinaci et al, 2013). Con ese título, se quieren destacar la relación entre materiales terrestres y procesos geológicos, y cómo estos dan lugar

a los minerales y rocas, y los transforman de manera continua a lo largo del tiempo. Todo ello bajo la acción del complejo sistema Tierra, con múltiples interacciones entre geosfera, hidrosfera, atmósfera y biosfera (ver Pascual, 2013, en este volumen).

Por definición todos los minerales y rocas se originan por medio de procesos geológicos, y no solo eso sino que los propios procesos geológicos que actúan sobre los materiales terrestres, los transforman y destruyen para formar nuevos materiales, y así sucesivamente de forma continua y cíclica. Esta cadena queda reflejada en el conocido ciclo geológico de las rocas, al que se hace referencia en cualquier manual básico de Ciencias de la Tierra, y al que hay que entender con ciertas limitaciones:

Se trata de una representación esquemática y simplificada, y como tal no da una respuesta completa a todos los escenarios posibles en la formación y transformación de los materiales terrestres.

La mayoría de las rocas solo son partícipes de una parte de dicho ciclo, aunque también se da el caso de materiales que se reciclan varias veces a lo largo de la historia geológica de la Tierra.

Las transformaciones de unas rocas en otras, siempre se deben de entender como parciales.

No obstante, aunque con esas limitaciones, el ciclo geológico de las rocas es útil para representar la posibilidad de que unos materiales terrestres procedan de otros y para poner de manifiesto la idea dinámica de la Tierra y de los procesos geológicos, que se pueden suceder y superponer en el espacio y en el tiempo de forma más o menos cíclica y continua.

Un mineral, que responde a una composición química y a una estructura cristalina determinadas, es estable bajo las mismas condiciones físico-químicas en que se formó. Si esas condiciones varían el mineral deja de ser estable y cambia su composición química y/o su estructura cristalina, transformándose en otro mineral. Un similar razonamiento se puede aplicar a una roca, ya que esta no es nada más que un agregado de uno o varios minerales, por tanto si los constituyentes minerales de una roca se transforman, la roca obviamente también. Aunque, también, una roca se puede transformar en otra diferente, sólo por la disgregación, o modificación del ordenamiento interno, de sus componentes minerales, sin que estos lleguen a transformarse.

Todos los procesos geológicos (ver: Fernández, 2013; Alfaro et al., 2013, en este volumen), actúan de alguna o de otra manera sobre los materiales terrestres, pero aquí se hace referencia únicamente a los procesos que son formadores de minerales y de rocas, o sea, los procesos: magmáticos, metamórficos, hidrotermales, meteóricos y sedimentarios.

Los procesos magmáticos, son los que están relacionados con la generación y solidificación de magmas, ocurren a muy altas temperaturas y dan lugar a las rocas magmáticas o ígneas (Figs. 3a, 3b, 3c, 4 y 5) (Hibbard, 1995; Klein y Philpotts, 2013). La gran diversidad de rocas magmáticas que existen en la corteza terrestre depende de muchos factores que a su vez están relacionados con los tres aspectos fundamentales de los procesos magmáticos: la fuente del magma, la diferenciación magmática y el emplazamiento como roca.

Pero, ¿cómo se forman las rocas magmáticas?, la respuesta más simple es por enfriamiento y solidificación de un magma. Y ¿un magma cómo y dónde se forma?, por fusión parcial de rocas del manto o de la corteza terrestre profunda, en zonas con una anomalía térmica debida a un elevado gradiente geotérmico y/o a descompresión, que vienen a coincidir con límites activos de placas o con puntos calientes de intraplaca. La composición de un magma varía en función de la composición de la fuente, y de la temperatura y presión a la que ocurre la fusión parcial. Los magmas más comunes son silicatados, que varían sus contenidos en SiO_2 , desde un 45% en los magmas basálticos, hasta cerca de un 70% en los magmas graníticos. Los magmas pobres en sílice suelen proceder de fusión parcial de rocas del manto, mientras que las rocas de la corteza continental, por fusión parcial dan lugar a magmas ricos en sílice. Una vez generado el magma, este tiende a ascender, con posibilidad de evolucionar en su composición por efecto de la disminución progresiva de la temperatura y de la presión. Un mismo magma puede evolucionar variando su composición por cristalización fraccionada de sus componentes, asimilación de materiales sólidos o mezcla con otros magmas, dando lugar a diferentes tipos de rocas. La cristalización fraccionada, con disminución de la temperatura a partir de un magma basáltico, comienza por las fases minerales más refractarias (olivinos, piroxenos, plagioclasas cálcicas), y termina con las menos refractarias (cuarzo, feldespatos alcalinos), en ese intervalo el magma residual tiende a enriquecerse en sílice y en volátiles, hasta que agota su contenido. De esta manera, las rocas que se forman en las fases iniciales de la cristalización fraccionada suelen estar constituidas por minerales ferromagnesianos o máficos (olivinos, piroxenos, anfíboles, biotita) y plagioclasas ricas en calcio. Mientras que las rocas que se forman en las fases finales están constituidas esencialmente por minerales no ferromagnesianos o félsicos (cuarzo, ortosa, plagioclasas sódicas, moscovita).

El último factor a tener en cuenta en la constitución de las rocas magmáticas o ígneas es el emplazamiento, o localización, en la corteza terrestre donde ocurre la solidificación principal del fundido magmático, y su transformación en roca. Este factor afecta sobre todo a la velocidad de enfriamiento del magma, y esta a su vez al grado de cristalización de los componentes que solidifican a partir del magma.

De esta manera surgen los dos grandes grupos de rocas magmáticas, las plutónicas (Fig. 4), que solidifican en profundidad en el interior de la corteza terrestre, con un enfriamiento lento, y se caracterizan por una completa cristalización de sus componentes (Fig. 3a), y las volcánicas (Fig. 5), que lo hacen sobre la superficie terrestre, con un enfriamiento rápido del magma, y se caracterizan por una cristalización incompleta de sus componentes, que parcial, o totalmente, solidifican como vidrio volcánico (Fig. 3c). La práctica totalidad de las rocas plutónicas tienen su equivalente volcánico, con igual composición química, posible variación en la composición mineralógica, y diferentes características estructurales y texturales (Figs. 3a, 3b y 3c).

Tradicionalmente no se habla de **procesos hidrotermales** como formadores de rocas, aunque lo sean, sino como formadores de mineralizaciones. No obstante hay bastante confusión en la literatura básica en el tratamiento de los procesos hidrotermales, que a veces se incluyen dentro los magmáticos, volcánicos y/o metamórficos, o simplemente se ignoran. Los procesos hidrotermales son los que tiene lugar por la acción de un fluido esencialmente acuoso y caliente (más de unos 50 °C), que puede llevar consigo una cierta diversidad de componentes disueltos (fluido hidrotermal). Los fluidos hidrotermales pueden ser de cualquier origen, aunque el más conocido es el magmático, como residuo final de la cristalización fraccionada de un magma rico en H_2O y otros volátiles. Pero hay fluidos hidrotermales que son liberados durante el metamorfismo, otros que proceden del agua atrapada en los sedimentos, y otros que son aguas superficiales que descienden a través de zonas permeables y fracturas, calentándose por efecto del gradiente térmico, o mediante anomalías térmicas (Almodóvar et al., 2012). La expresión superficial de los fluidos hidrotermales se tiene en los geysers, fumarolas y fuentes termales, que son muy comunes, sobre todo en áreas volcánicas y/o con anomalías geotérmicas y asociadas a fracturas profundas. Un sistema hidrotermal, definiendo como tal a la zona de circulación y de depósito hidrotermal, con frecuencia, participa de fluidos de diversas procedencias, p. ej., en un sistema hidrotermal de fondo oceánico asociado a una dorsal, es normal que participen fluidos de origen magmático y, sobre todo, fluidos procedentes del agua marina (Almodóvar et al., 2012).

Los fluidos hidrotermales circulan por zonas permeables de la corteza, interaccionando con las

Fig. 4 (izquierda).- Rocas magmáticas plutónicas. Cantera de granito en Extremadura, en la que se aprecia la textura coherente y compacta propia de las rocas plutónicas.



Fig. 5 (derecha).- Rocas magmáticas volcánicas. Panorámica del Teide (Tenerife), en la que se visualiza la morfología del cono volcánico, construido a partir de varios episodios de composición esencialmente basáltica.



rocas a través de las que circulan provocando tanto la modificación o alteración de las rocas como la modificación de su propia composición, al mismo tiempo que dan lugar a depósitos minerales y/o rocas, en el interior de la corteza y sobre la superficie terrestre. Existen dos tipos de rocas que se forman en relación con procesos hidrotermales: 1) las rocas metasomáticas (Fig. 6), que se forman por la interacción entre rocas preexistentes y fluidos hidrotermales (Zharikov et al., 2007), que suelen tener una extensión local, salvo las relacionadas con metasomatismo de fondo oceánico asociado a dorsales oceánicas, que pueden tener extensión regional; y 2) los depósitos hidrotermales, entre los que se encuentran numerosas asociaciones minerales de interés económico, que no suelen recibir el nombre de rocas, si bien existen casos que sí los reciben, como los travertinos y los “sinter” silíceos comúnmente asociados a fuentes termales, fumarolas y geysers.

Los procesos metamórficos llevan consigo cambios en la composición mineralógica y textural de rocas preexistentes, cuando estas se someten a condiciones de temperatura y/o presión diferentes a las que las originaron. Ocurren en zonas más o menos profundas de la corteza terrestre, y dan lugar a las rocas metamórficas (Figs. 3d, 3e, 3f y 7). Hay varios tipos de metamorfismo en función de su extensión regional o local, y de las condiciones de presión y temperatura (Smulikowski, 2003). El metamorfismo regional es el más común y está asociado a las zonas internas de las cordilleras orogénicas (Fig. 7), su intensidad es variable desde grado muy bajo, a bajas presiones y temperaturas, a grado alto con elevadas presión y temperatura. En algunos casos predomina la presión sobre la temperatura, o viceversa. El metamorfismo térmico, de alta temperatura y baja presión, también es un proceso común pero de extensión local, que suele estar asociado a las aureolas de contacto de intrusiones plutónicas.

La composición mineralógica de las rocas metamórficas depende de dos factores principales: de la litología de la roca original y de las condiciones fisicoquímicas del metamorfismo. Durante el metamorfismo ocurren reacciones entre los minerales, normalmente en estado sólido, de manera que cada grado metamórfico se relaciona con asociaciones minerales concretas, que se utilizan para determinar las condiciones fisicoquímicas que existieron durante el metamorfismo (Vernon y Clark, 2008). Algunas rocas metamórficas pueden tener exactamente la misma composición que las rocas originales de las que proceden, lo cual ocurre para rocas monominerálicas, como el mármol y la cuarcita, cuyos componentes, calcita y cuarzo respectivamente, son estables dentro de un amplio rango de condiciones fisicoquímicas. Durante el metamorfismo se produce deshidratación y deshidrolización de los minerales originales, con la consiguiente liberación de componentes volátiles (entre los que destaca el H_2O), y dando lugar a fluidos hidrotermales que circulan principalmente a través de fracturas hacia zonas más superficiales de la corteza.

Las rocas formadas en zonas más o menos profundas de la corteza terrestre, por efecto de movimientos corticales, la tectónica y la erosión son



Fig. 6. Rocas metasomáticas. Rocas calcosilicatadas de skarn en Cala (Huelva), dentro de la zona de Ossa-Morena del Macizo Ibérico. Están constituidas por granate, piroxeno, anfíbol, epidota y calcita. Se formaron por la interacción entre un fluido hidrotermal de origen magmático y rocas sedimentarias carbonatadas.

susceptibles de alcanzar la superficie terrestre y ser partícipes de los procesos geológicos externos.

La meteorización es un proceso geológico externo que afecta a los minerales y rocas de la superficie terrestre, por su interacción con componentes de la hidrosfera, atmósfera y biosfera, y lleva consigo una diversidad de reacciones minerales, que a su vez pueden provocar tanto la destrucción de minerales preexistentes como la formación de nuevos minerales y la alteración de las rocas. Es de intensidad y características variables en función del clima, de la litología original de la roca y del tiempo. Este proceso provoca la disgregación de los componentes originales de las rocas, por disolución y movilización de sus componentes más inestables, y al mismo tiempo la concentración residual de los componentes más estables. La meteorización en zonas protegidas de la erosión potencia la actividad orgánica y es favorecida por ella, dando lugar a la formación de los suelos.

Los procesos sedimentarios, junto a meteorización, erosión y transporte, constituyen el ciclo geológico externo de las rocas, y dan lugar a las rocas sedimentarias (Figs. 3g, 3h, 3i, 8 y 9). En el proceso sedimentario hay que considerar el área fuente, el transporte y el depósito. Los fragmentos disgregados y los componentes disueltos generados por meteorización y erosión de las rocas preexistentes en las áreas fuente, son susceptibles de ser transportados por la acción del agua, en cualquiera de sus estados, del aire y de la gravedad hasta el lugar de depósito, o cuenca sedimentaria, y depositados en forma de sedimentos (Nichols, 1999). Los procesos posteriores al depósito, pueden transformar los sedimentos en rocas sedimentarias, por compactación y cementación. Las rocas sedimentarias son de tres



Fig. 7. Rocas metamórficas. Paisaje de rocas metamórficas, entre las que predominan los micaesquistos, en la zona interna de la cordillera Bética. Panorámica desde el pico del Veleta, con los picos de Alcazaba y Mulhacen, al fondo (Sierra Nevada, Granada).

Fig. 9. Rocas sedimentarias detríticas. Panorámica de los Mallos de Riglos, constituidos por conglomerados del Mioceno, formados como abanicos aluviales durante el levantamiento de los Pirineos, en el borde norte de la cuenca del Ebro (Huesca).



tipos: detríticas (Fig. 8), constituidas por fragmentos y partículas de rocas y minerales de rocas preexistentes (Figs. 3g, 3h y 3i); de precipitación química (Fig. 9), formadas a partir de componentes disueltos en el agua que los transporta; y biogénicas (Fig. 10), originadas por acumulación de restos orgánicos. Cada tipo de cuenca sedimentaria, sea continental o marina, se caracteriza por una determinada asociación y secuencia de tipos de rocas sedimentarias. De manera que el estudio de estas da la clave para conocer las características geológicas, geográficas y ambientales de los medios de depósito del pasado geológico (Nichols, 1999, Arche, 2010).

Las relaciones genéticas y espacio-temporales entre distintos tipos de rocas, pueden ser muy variables, desde muy simples, como p. ej., en secuencias sedimentarias concordantes, a muy complejas, en función de los procesos geológicos que las afecten, pudiéndose superponer en el tiempo y en el espacio condiciones físico-químicas muy diversas, con varias fases de transformación, o alteración, de unas rocas en otras.

Fig. 8. Rocas sedimentarias de precipitación química. Formaciones carbonatadas del Cretácico en el Parque Nacional de Ordesa, en la cordillera pirenaica (Huesca).

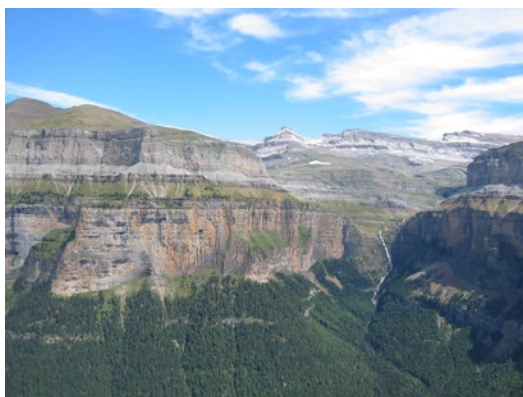


Fig. 10. Rocas sedimentarias biogénicas. Detalle de calizas arrecifales de rudistas del Cretácico inferior (Ereño, Vizcaya). (Foto de N. Velilla).



MATERIALES TERRESTRES Y TIEMPO GEOLÓGICO

La geología es una ciencia histórica y gracias al estudio de los materiales terrestres conocemos la evolución de las condiciones físico-químicas y ambientales a lo largo de la historia de la Tierra. Los geólogos pueden leer en las rocas y minerales los procesos que ocurrieron hace millones de años y establecer la historia geológica de cualquier región del globo terrestre. Todo ello, por medio de la aplicación de principios fundamentales como el de superposición de rocas estratificadas, la datación relativa basada en las relaciones espaciales y genéticas entre materiales y el contenido fosilífero de las rocas, junto con la datación absoluta de minerales. Por tanto se puede decir que los materiales terrestres dan la clave para el conocimiento de la evolución física, química, geológica y biológica de la Tierra. Para más detalle también se puede consultar a Fernández (2013), en este mismo volumen.

A lo largo de la historia de la Tierra ha habido cambios importantes en sus condiciones físico-químicas y ambientales (Anguita, 1988), que se han visto reflejados en los minerales y rocas a lo largo del tiempo geológico, de manera que autores como Hazen y Ferry (2010), han propuesto varias etapas de evolución mineral de la Tierra, con una diversidad mineral creciente desde el origen del planeta hasta el presente (Fig. 11). Varios factores globales han influido en esta evolución, aunque los más decisivos hay que buscarlos en el enfriamiento progresivo de la Tierra, en los cambios atmosféricos globales, especialmente en el paso a una atmósfera oxidante, hace unos 2.500 Ma, y en la diversidad biológica, que tiene su explosión a partir del Fanerozoico, hace 540 Ma (Hazen y Ferry, 2010).

Hay rocas magmáticas, con altos contenidos en magnesio, de la serie komatítica (Hibbard, 1995; Klein y Philpotts, 2013), que solo se formaron en tiempos precámbricos, cuando el gradiente geotérmico de la Tierra era suficientemente alto como para provocar una elevada tasa de fusión parcial de los materiales del manto terrestre, capaz de generar magmas ricos en magnesio, que posteriormente con el enfriamiento progresivo del planeta, no se han vuelto a dar.

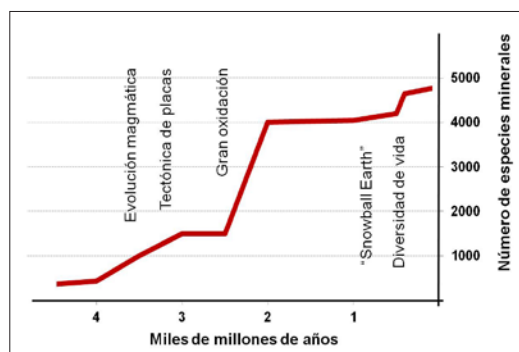


Fig. 11. Evolución del número de especies minerales con el tiempo geológico. Se señalan algunos acontecimientos geológicos globales con influencia en la distribución temporal y diversidad de minerales y rocas. (A partir de datos de Hazen y Ferry, 2010).

La mayor diversidad mineral, se dio en el paso de atmósfera reductora a oxidante, lo cual obviamente afectó a los procesos geológicos superficiales. La alta disponibilidad de oxígeno para combinarse con otros elementos químicos fue la causa de ese aumento de la diversidad mineral (Hazen y Ferry, 2010). Los cambios globales de condiciones reductoras a oxidantes de los océanos, y viceversa, a su vez relacionadas con glaciaciones globales ("snowball Earth"), que se dieron en varias etapas del Precámbrico (Hoffman y Schrag, 2000), también fueron los causantes de la existencia de las grandes formaciones ferríferas ("banded iron-formations") (Young, 2002). La proliferación de la vida en el Fanerozoico, y el aumento de las interacciones entre materia orgánica e inorgánica (biosfera y geosfera), aporta el último factor decisivo en la actual diversidad mineral de la Tierra.

UTILIDAD INDUSTRIAL Y SOCIAL DE LOS MATERIALES TERRESTRES

Los materiales terrestres se utilizan por el hombre y la sociedad desde tiempos prehistóricos. En un principio solo se utilizaban como herramientas, pero en la actualidad sus usos se han diversificado, de manera que han propiciado el progreso industrial y tecnológico de nuestra sociedad (Frank et al. 2005). Los actuales hábitos de vida de los países desarrollados no serían posibles sin el uso de los minerales y de las rocas, porque de ellos se obtiene la materia prima necesaria tanto para la construcción de ciudades, como para una gran diversidad de industrias, que fabrican desde las herramientas y objetos más simples a los instrumentos más sofisticados.

Los minerales y las rocas se utilizan de tres maneras diferentes, una para la obtención a partir de ellos de elementos y sustancias químicas, otra para utilizarlos según sus propiedades físicas y químicas y por último para utilizarlos por su belleza. Lo cual viene a coincidir con los siguientes grandes grupos: menas, minerales y rocas industriales y gemas y minerales ornamentales (Dill, 2010). Una cuarta manera de utilizar los materiales terrestres es para la producción de energía, por medio de los minerales radioactivos y de los combustibles fósiles (carbón y petróleo). Los minerales radioactivos, también se consideran menas, mientras que los combustibles fósiles tienen un sistema de explotación y tratamiento similar al de las rocas industriales.

Los minerales menas son los que tradicionalmente se usan para la obtención de metales, y para su aprovechamiento es necesario someterlos a un proceso metalúrgico (p. ej., calcopirita, de la que se obtiene cobre). Los minerales y rocas industriales, constituyen un grupo muy diverso, entre los que se encuentran los minerales que presentan alguna propiedad de interés industrial (p.ej., sepiolita, que usa como absorbente), los materiales de construcción (casi todas las rocas tienen esta utilización tal cual, aunque a veces deben transformarse (p. ej., calizas y arcillas para la fabricación de cemento), rocas ornamentales (todas las rocas compactas, p.

ej., el granito), y los materiales que se usan como combustibles fósiles, que también tienen una utilización industrial (p. ej. el asfalto, como aglomerante e impermeabilizante).

El grupo más sencillo es el de las gemas y minerales ornamentales, cuyo principal uso económico es en joyería (p. ej., diamante), y como minerales decorativos.

Hay muchos minerales y rocas que tienen diversos usos y por tanto se incluyen en varios de los grupos mencionados (p. ej., el diamante que además de utilizarse, sus variedades de calidad gema, en joyería, se utiliza industrialmente como abrasivo debido a su alta dureza).

Para más información sobre el interés económico y utilidad de los materiales terrestres, así como sobre propuestas didácticas al respecto, se puede consultar el número monográfico de la revista (Gil y Calvo, 2008), dedicado a los recursos geológicos.

Agradecimientos

A Teodosio Donaire, a Juan Jiménez Millán y al coordinador de este número de la revista, por sus revisiones y sugerencias. A Nicolás Velilla por la cesión de algunas de las fotos que ilustran este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams, A.E., MacKenzie, W.S. y Guilford, C. (1997). *Atlas de rocas sedimentarias*. Ed. Masson, 106 p.
- Alfaro, P., Alonso-Chaves, F.M., Fernández, C. y Gutiérrez-Alonso, G. (2013). Tectónica de placas, teoría integradora sobre el funcionamiento del planeta. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 168-180.
- Anguita, F. (1988). *Origen e historia de la Tierra*. Ed. Rueda, 525 p.
- Almodóvar, G.R., Sáez, R., Toscano, M., Moreno, C., Donaire, T., Nieto, J. M., González, F., Yesares M.D. y Pascual, E. (2012). La Faja Pirítica Ibérica. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20.2, 210-214.
- Arche, A. (Ed) (2010). *Sedimentología: Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Textos universitarios 46, CSIC. 1288 p.
- Arribas, M.E., Arribas, J., De la Peña, J.A., Estrada, R., López-Acevedo, F.J., Marfil, R. y Varas, M.J. (2007-2013). *Atlas de Petrología Sedimentaria*. <http://www.ucm.es/info/petrosed/>
- Bastida, F. (2005). *Geología. Una visión moderna de las Ciencias de la Tierra (volumen I)*. Ediciones Trea, S. L., Gijón. 974 pp.
- Benavente, D., Cañaveras, J.C., Martínez Martínez, J., Muñoz Cervera, M., Rodríguez García, M. y Ordóñez, S. (2012). Identificación de minerales mediante difracción de rayos X utilizando bases de datos online de libre acceso. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20.3, 280-289.
- Dana (1837). *System of Mineralogy*. Ed. Durrie & Peck.
- Deer, W. A., Howie, R. A. y Zussman, J. (1992). *An introduction to the rock-forming minerals*. (2nd. Edition). Longman, Londres, 696 p.
- Dill, H.G. (2010). The "chessboard" classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth-Science Reviews*, 100, 1-420.

- 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.
- Fernández-Martínez, E. M. (2013). Enfoques emergentes en la investigación de la historia de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 155-167.
- Frank, D., Galloway, J. y Assmus, K. (2005). *The Life Cycle of a Mineral Deposit—A Teacher's Guide for Hands-On Mineral Education Activities*. USGS, Science for a Changing World. U.S. Geological Survey, 17, 40 p. <http://pubs.usgs.gov/gip/2005/17/>
- Fry, N. (1992). *The field description of metamorphic rocks*. John Wiley & Sons, 110 p.
- Gaines, R.V., Skinner, H.C.W., Foord, E.E. y Rosenzweig, A., (1997). Dana's new mineralogy. 8ª Ed, John Wiley & Sons, New York, 1819 p.
- Gallegos, J.A. (1997). Identificación “de visu” de rocas y minerales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 5.2, 117-123.
- Gil C. y Calvo J.P.(coords.) (2008). Recursos geológicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*. Monográfico 16.3., 308 p.
- Hazen, R.M. y Ferry, J.M. (2010). Mineral Evolution: Mineralogy in the Fourth Dimension. *Elements* 6, 9-12.
- Hibbard, M.J. (1995). *Petrography to Petrogenesis*. Prentice Hall, 587 p.
- Hibbard, M.J. y Hibbard M. (2002). *Mineralogy: A geologists point of view*. McGraw-Hill, 562 p.
- Hoffman, P.F. y Schrag, D.P., (2000). Snowball Earth. *Scientific American* 282, 68-75.
- IMA (2013). The official IMA-CNMNC List of Mineral Names. [http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/IMA_Master_List_\(02-2013\).pdf](http://pubsites.uws.edu.au/ima-cnmnc/IMA_Master_List_(02-2013).pdf)
- Jerram, D. y Petford, N. (2011). *The Field Description of Igneous Rocks*. Second Edition, The Geological Field Guide Series, Wiley-Blackwell, 256 p.
- Jiménez Millán, J. y Velilla, N. (2004). “Óptica 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., (2013). *Earth Materials: Introduction to Mineralogy and Petrology*. Cambridge University Press. 533 p.
- Klein, C. y Hurlbut, C. (1996). *Manual de Mineralogía*. Tomo 1. Ed. Reverté, 368 p.
- Klein, C. y Hurlbut, C. (1997). *Manual de Mineralogía*. Tomo 2. Ed. Reverté, 311 p.
- Le Bas, M.J. y Streckeisen, A.L., (1991). The IUGS systematics of igneous rocks. *J. Geol. Soc. London* 148, 825-833. <http://www.utdallas.edu/~aiken/SHAKEBAKE/rockclassification.pdf>
- Le Maitre, R.W. (Ed.) (2002). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. 2nd Ed. Cambridge University Press, 236 p.
- MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H. y Guilford, C. (1982). *Atlas of Igneous Rocks and their Textures*. Ed. Wiley, 148 p.
- Nichols, G. (1999). *Sedimentology and Stratigraphy*. Blackwell Publishing, 419 p.
- Nickel, E.H. (1995). The definition of a mineral. *The Canadian Mineralogist*, 33, 689-690. [http://www.min-socam.org/msa/ima/ima98\(04\).pdf](http://www.min-socam.org/msa/ima/ima98(04).pdf)
- Nogués, J.M. (2002). Recursos didácticos en Cristalografía, Mineralogía y Ciencias de los Materiales. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10.1, 90-95.
- Pascual, J.A. (2013). La Tierra como sistema. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2,
- Pedrinaci, E., Alcalde, S., Alfaro, P., Almodóvar, G.R., Barrera, J.L., Belmonte, A., Brusi, D., Calonge, A., Cardona, V., Crespo-Blanc, A., Feixas, J.C., Fernández-Martínez, E., González-Díez, A., Jiménez-Millán, J., López-Ruiz, J., Mata-Perelló, J.M., Pascual, J.A., Quintanilla, L., Rábano, I., Rebollo, L., Rodrigo, A. y Roquero, E. (2013). Alfabetización en ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 21.2, 117-129.
- Smulikowski, W., Desmons, J., Harte, B., Sassi, F.P. y Schmid, R. (2003). *A systematic nomenclature for metamorphic rocks: 2. Types, grade and facies of metamorphism*. IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks. Recommendations, web version of 01.02.2007. <http://www.bgs.ac.uk/scmr/products.html>
- Strunz, H. (1941). *Mineralogische Tabellen*. Ed. Becker & Erler, 287 p.
- Tucker, M.E. (2011). *Sedimentary Rocks in the Field: A Practical Guide*. The Geological Field Guide Series. Ed. Wiley-Blackwell, 288 p.
- Vernon, R.H. y Clarke, G. (2008). *Principles of Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press. 446 p.
- Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59, 7, 1217-1232.
- Yardley B.W.D., MacKenzie W.S. y Guilford C. (1997). Atlas de rocas metamórficas y sus texturas. Ed. Elsevier, 120 p.
- Young, G.M., (2002). Stratigraphic and tectonic settings of Proterozoic glaciogenic rocks and banded iron-formations: relevance to the snowball Earth debate. *Journal of African Earth Sciences* 35, 451-466.
- Zharikov V.A., Pertsev N.N., Rusinov V.L., Callegari E. y Fettes D.J. (2007). *Metasomatism and metasomatic rocks*. Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07 <http://www.bgs.ac.uk/scmr/products.html>. ■

Fecha de recepción del original: 07/04/2013
 Fecha de aceptación definitiva: 20/06/2013