



Parecem plantas fósseis, mas são dendritos Parecen plantas fósiles pero no, son dendritas

THEY LOOK LIKE FOSSIL PLANTS, BUT NOT, THEY ARE DENDRITES

JOSÉ SELLÉS-MARTÍNEZ

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOLÓGICAS, FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS, UNIVERSIDADE DE BUENOS AIRES, BUENOS AIRES, ARGENTINA.

E-MAIL: PEPE@GL.FCEN.UBA.AR

CELSO DAL RÉ CARNEIRO (TRADUTOR)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO E HISTÓRIA DE CIÊNCIAS DA TERRA, INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS, BOLSISTA DO CNPq, CAMPINAS, SP, BRASIL. E-MAIL: CEDREC@UNICAMP.BR

Abstract: Dendrites, although recognized as of inorganic origin by geologists and paleontologists for centuries, are often confused with fossil plant organisms at a popular level. In this work, the elements that are key to their differentiation from true fossils are presented, as well as a brief summary of the mention and illustration of dendrites in historical texts. Aspects that refer to their shape (highlighting their fractality), their mineral composition, the physical-chemical mechanisms that control their genesis and the environments and geological circumstances that enable their development are also discussed. The work concludes with the inclusion of a series of practical activities that allow experimentally obtaining dendritic patterns, and a selection of works and Internet sites that contain information of interest on the subject.

Resumo: Os dendritos, embora reconhecidos por séculos como de origem inorgânica pelos geólogos e paleontólogos, são popularmente confundidos com organismos vegetais fósseis. Neste trabalho, apresentam-se os elementos essenciais para sua diferenciação dos fósseis verdadeiros e, após um breve resumo da menção e ilustração dos dendritos em textos históricos, desenvolvem-se diferentes aspectos relacionados à forma, com destaque para sua característica fractal típica; composição mineral; mecanismos físico-químicos que controlam sua gênese e os ambientes e circunstâncias geológicas que permitem seu desenvolvimento. O trabalho inclui uma série de atividades práticas que permitem a obtenção experimental de formas dendríticas e uma seleção de trabalhos e sites da Internet que contêm informações de interesse sobre o assunto.

Resumen: Las dendritas, si bien ya reconocidas como de origen inorgánico por geólogos y paleontólogos desde hace siglos, son muchas veces confundidas con organismos vegetales fósiles a nivel popular. En este trabajo se presentan los elementos que son claves para su diferenciación de los verdaderos fósiles y luego de un breve resumen de la mención e ilustración de las dendritas en textos históricos se desarrollan diferentes aspectos en referencia a su forma (destacándose su fractalidad), su composición mineral, los mecanismos físico-químicos que controlan su génesis y los ambientes y circunstancias geológicas que posibilitan su desarrollo. El trabajo se completa con la inclusión de una serie de actividades prácticas que permiten la obtención experimental de formas dendríticas y una selección de trabajos y sitios de internet que contienen información de interés sobre el tema.

Citation/Citação: Sellés-Martínez, J. S. (2020). Parecen plantas fósiles pero no, son dendritas. Trad. por C. D. R. Carneiro. *Terraê Didática*, 16, 1-19, e020024. doi: 10.20396/td.v16i0.8659636

Keywords: Shape, Mineralogy, Fractals, Origin, Geology.

Palavras chaves: Dendritos, Mineralogia, Fractais, Origem, Geologia.

Palabras clave: Forma, Minerología, Fractales, Origen, Geología.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 15/05/2020

Revised/Corrigido: 24/05/2020

Accepted/Aceito: 08/06/2020



Introdução

Ao saber que somos geólogos, muitas pessoas orgulhosamente nos mostram “plantas fósseis” ou “samambaias” que mantêm como decoração em suas casas. Se, por um lado, somos obrigados a decepcioná-las por não se tratar daquilo que parecem ser, por outro, verificamos que, ao saber que não são fósseis, o fato desperta interesse em conhecer de quê, afinal, realmente se trata. Como resultado de tantas situações comuns, achamos pertinente preparar esta nota e explicar porque sabemos que não se trata de plantas fósseis e qual é a composição, as razões para o *design* e os mecanismos de formação de **dendritos**.

Introducción

A muchos nos ha pasado que las personas, al enterarse de que somos geólogos, nos muestran con orgullo los “helechos” o “plantas fósiles” que conservan como adornos en sus casas. Si bien por un lado nos toca desengañar a esas personas con respecto a que no se trata de lo que parece, por el otro lado hemos podido comprobar que el hecho de que no se trate de restos fósiles vegetales, despierta interés por conocer de qué se trata en realidad. Es a raíz de estas situaciones que nos ha parecido pertinente elaborar esta nota y explicar porque sabemos que no son plantas y cuales son la composición, las razones del diseño y los mecanismos de formación de las **dendritas**.

O artigo é destinado a professores de ensino pré-universitário, sendo organizado sob perspectiva essencialmente educacional, como texto popular desprovido de resultados de pesquisas originais dos autores. Introduzimos referências a algumas obras históricas relevantes, antes de abordar os aspectos relacionados à mineralogia e origem dos dendritos. A seguir, descrevemos alguns padrões geométricos, com ênfase no notável crescimento fractal de muitos espécimes. Analisamos os mecanismos físico-químicos que regulam sua formação, completando a parte conceitual com algumas reflexões sobre quais ambientes e processos geológicos atenderiam aos requisitos necessários para gerar dendritos. Finalmente, incluímos atividades práticas simples que, além de ter valor histórico para ilustrar como se desenvolveu o conhecimento, podem ser altamente motivadoras para os alunos e fomentar-lhes o desenvolvimento de atitudes científicas, mediante a aplicação prática de uma sequência ideal de: “preparação da experiência – execução – observação dos resultados – descrição – análise – conexão com informações pré-existentes – discussão – desenho – conclusões”.

Não são fósseis

Embora seja conhecido há séculos que os dendritos não são fósseis verdadeiros e nenhum geólogo ou paleontólogo se confunda com eles, o público em geral ainda propaga a ideia de serem fósseis (basta verificar que há “fósseis vegetais” em sites de vendas de minerais e rochas na Internet). O primeiro campo da Ciência que aponta a impossibilidade de serem fósseis é a Paleobotânica. Foi estabelecido que as primeiras plantas terrestres surgiram cerca de 470 milhões de anos atrás (no período Ordoviciano), enquanto as samambaias se originaram na metade do período Devoniano (cerca de 360 milhões de anos atrás). Mesmo assim, marcas de dendritos são comuns em rochas mais antigas, que podem exceder 1.000 milhões de anos. Por outro lado, as plantas que se desenvolvem nos continentes nunca poderiam ser encontradas nos ambientes marinhos onde se precipitam calcários e dolomitos, que são as unidades litológicas nas quais as feições aparecem com mais frequência. Um dendrito típico é reproduzido na Figura 1a. Para comparação, uma samambaia fóssil verdadeira está na Figura 1b.

Uma evidência adicional de não serem samambaias, ou outras plantas do passado, resulta de con-

El presente trabajo está dirigido a profesores de enseñanza pre-universitaria y organizado como un artículo de divulgación que no incluye resultados de investigaciones originales de sus autores. Es con esta perspectiva fundamentalmente educativa que hemos introducido referencias a algunas obras históricas relevantes antes de abordar los aspectos vinculados a la mineralogía de las dendritas para luego describir las de sus patrones gráficos y el crecimiento notablemente fractal de muchos ejemplares. Se analizan luego los mecanismos físico-químicos que regulan su formación, completándose la parte conceptual con algunas reflexiones acerca de qué ambientes y procesos geológicos cumplirían los requisitos necesarios para que se generen las dendritas. Se incluyen luego algunas actividades prácticas sencillas que, además de tener valor histórico en el desarrollo del conocimiento del tema, pueden ser altamente motivadoras para los estudiantes y servir de punto de partida para desarrollar en ellos actitudes científicas y la práctica de la secuencia “preparación y realización de la experiencia-observación de los resultados-descripción-análisis-vinculación a la información preexistente-discusión-elaboración de conclusiones” por parte de los alumnos.

No son fósiles

Si bien el hecho de que las dendritas no son verdaderos fósiles ya es conocido desde siglos atrás y ningún geólogo o paleontólogo se dejaría confundir por ellas, la idea de que sí lo son sigue vigente entre el público general (puede verificarse que a veces se promocionan como fósiles de vegetales en los sitios de venta de minerales y rocas en la Internet). La primera en señalar la imposibilidad de que se trate de fósiles es la Paleobotánica. Se ha podido establecer que las primeras plantas terrestres hacen su aparición hace unos 470 millones de años (en el período Ordovícico), mientras que los helechos se originaron a mediados del período Devónico (hace unos 360 millones de años) y, sin embargo, estas marcas son habituales en rocas de mayor antigüedad, que pueden superar los 1.000 millones de años. Por otro lado las plantas que se desarrollan en los continentes nunca podrían encontrarse en los ambientes marinos en que se desarrollan las calizas y dolomías, que son las unidades litológicas en las que aparecen con mayor frecuencia estas figuras. En la Figura 1a se reproduce una dendrita típica y en la Figura 1b un verdadero helecho fósil para su comparación.

Una evidencia adicional de que no se trata de hele-



Figura 1. (a) Dendrito de manganês típico, cujo desenho imita uma planta fóssil (amostra de Sierras Bayas, Olavarría, Argentina. Foto do autor JSM. (b) Folhas de uma samambaia fóssil (*Neuropteris Sp.*) em folhelhos do Carbonífero, Osnabrueck, Alemanha. URL: <https://www.christies.com/lotfinder/Lot/a-fossil-fern-osnabrueck-germany-6024371-details.aspx>

Figura 1. (a) Típica dendrita de manganeso cuyo diseño remeda una planta fósil (muestra procedente de Sierras Bayas, Olavarría, Argentina. Fotografía del autor JSM. (b) Hojas de un helecho fóssil (*Neuropteris Sp.*) en las lutitas del Carbonífero de Osnabrueck, Alemania. URL: <https://www.christies.com/lotfinder/Lot/a-fossil-fern-osnabrueck-germany-6024371-details.aspx>

siderar que não são encontradas apenas em planos horizontais, como a superfície de estratificação de sedimentos (caso da Fig. 1a), mas também em fraturas verticais dos blocos de rocha. A Figura 2 mostra um conjunto de planos de fratura muito próximos um do outro, aflorantes na pedreira de Malegni (Sierras Bayas, província de Buenos Aires, Argentina). Os planos são recobertos por dendritos que parecem ter crescido radialmente e de cima para baixo, a partir de vários pontos alinhados em uma superfície subhorizontal. Uma folha vegetal, fina e flexível, jamais poderia ter permanecido nessa posição enquanto o sedimento se acumulava ao seu redor.

Tendo esclarecido que não se trata de plantas fósseis verdadeiras, convém explicar quais são suas principais características. Para isso, é necessário referir-se à composição, ou seja, de quê eles são feitos, e aos fatores que determinam sua forma particular, para depois discutir possíveis mecanismos capazes de gerá-los. Antes, porém, é sempre bom fazer um pouco de história...

chos (ni de otra planta del pasado) surge de considerar que no sólo se encuentran en planos horizontales, como la superficie de estratificación de los sedimentos (caso de la Fig. 1a) sino también en fracturas verticales de los bloques de roca. La Figura 2 muestra un conjunto de planos de fractura muy próximos entre sí, aflorantes en la cantera Malegni (Sierras Bayas, Prov. de Buenos Aires, Argentina). Estos planos están cubiertos por dendritas que parecen haber crecido en forma radial y de arriba hacia abajo a partir de diversos puntos alineados sobre una superficie subhorizontal. Nunca una delgada y flexible hoja de un vegetal habría podido quedar en esa posición mientras el sedimento se acumulaba a su alrededor.

Una vez aclarado que no se trata de verdaderas plantas fósiles corresponde ahora explicar qué son entonces estos rasgos. Para eso es necesario referirse tanto a su composición, es decir de qué están hechas, como a las razones de su particular forma, para luego discutir los posibles mecanismos que los generarían. Pero antes siempre es bueno hacer un poco de historia



Figura 2. Dendritos de manganês em um conjunto de superfícies verticais. Fotografia do autor JSM
Figura 2. Dendritos de manganeso sobre un conjunto de superfícies verticales. Fotografía del autor JSM

Um pouco de história

É natural que, desde o início, figuras tão curiosas quanto os dendritos tenham despertado a curiosidade dos naturalistas, sendo incorporadas às coleções e “gabinetes de maravilhas” que se tornaram populares após o Renascimento. À medida que avançou o conhecimento geológico, começaram a ser reconhecidas variedades de forma e composição e a serem lançadas hipóteses sobre sua origem e mecanismo de formação.

Nicolás Steno [1638-1686], um dos pais da Geologia, publicou em 1669 um pequeno trabalho que, no entanto, contém ideias fundamentais para consolidação da disciplina. No parágrafo dedicado às plantas fósseis (Steno, 1669, Sequeiros, 2003), ele se refere a “plantas inscritas em rochas” e aponta sua semelhança com várias formas de cristalização e conclui, com base em várias observações, que não são verdadeiras plantas fósseis.

Amostras e representações de dendritos aparecem em lapidários e publicações clássicas, entre as quais a coleção de Leone Strozzi do final do século XVII. Os trabalhos de A. J. DeZallier D’Argenville, G. W. Knorr (concluídos por J. E. I. Walch) aparecem em 1755 e serviram de modelo

Un poco de historia

Como es natural, figuras tan curiosas como las dendritas despertaron tempranamente la curiosidad de los naturalistas y fueron incorporadas a las colecciones y “gabinetes de maravillas” que se popularizan a partir del Renacimiento y, a medida que el conocimiento geológico fue avanzando, comenzaron a reconocerse tanto sus variedades de forma como de composición y a aventurarse hipótesis acerca de su origen y mecanismo de formación.

Nicolás Steno (1638-1686), uno de los padres de la Geología, publicó en 1669 una breve obra que, no obstante, contiene ideas fundamentales para la consolidación de esta disciplina. En el párrafo dedicado a las plantas fósiles (Steno, 1669, Sequeiros, 2003) se refiere a las “plantas inscritas en las piedras” y señala su semejanza con diversas formas de cristalización y concluye, en función de diversas observaciones, que no son verdaderas plantas fósiles.

Muestras y representaciones de dendritas aparecen en lapidarios y publicaciones clásicas, entre las que pueden mencionarse la colección de Leone Strozzi de fines del siglo XVII. En 1755 aparecen las obras de A. J. DeZallier D’Argenville, G. W.

para outros autores como P. J. Buc'hoz e o catálogo preparado por A. L. Wirsing. Esses autores diferenciam os dendritos dos fósseis verdadeiros e esclarecem que os dendritos “representam” plantas e associam os desenhos resultantes a elementos diferentes (às vezes bastante exóticos, como “a cabeça de um mouro com um chapéu espanhol”). Em alguns desses trabalhos, as placas de pedra contendo fósseis e dendritos foram “iluminadas”, isto é, enriquecidas com cores, na maioria das vezes com resultados muito irreais. Não foi possível esclarecer se as cores já haviam sido adicionadas às lajes originais de rocha (por falsificação?) ou foram incorporadas para tornar as placas mais atraentes. A Figura 3a (obtida de Knorr, 1755) exemplifica um camarão fóssil em um prato que provavelmente provém da área de Cerín, na França (de onde vem o peixe circundado por dendritos da Figura 6). A Figura 3b exibe desenhos dendríticos sobre os quais o autor (Wirsing, 1755) ressalta que em parte simula uma ilha, de onde ascendem nuvens e vapores, como em *Campi Flegrei* [supervulcão situado perto de Nápoles, Itália]. Ele acrescenta que, a partir da imaginação de cada um, pode-se chegar a diferentes interpretações...

Na transição do século XVIII para o século XIX, os colecionadores começaram a adotar os critérios estabelecidos por mineralogistas e petrógrafos, separando os materiais por sua composição e classificação genética. Entre eles, destaca-se o colecio-

Knorr (completada por J. E. I. Walch) que servirá de modelo para outros autores como P. J. Buc'hoz y el catálogo preparado por A. L. Wirsing. Estos autores diferencian las dendritas de los verdaderos fósiles y aclaran que las dendritas “representan” vegetales y asocian los diseños resultantes a diferentes elementos (a veces bastante exóticos, como por ejemplo “la cabeza de un moro con sombrero a la española”). En algunas de estas obras las placas de piedra portadoras tanto de fósiles como de dendritas han sido “iluminadas”, es decir enriquecidas con color, la mayor parte de las veces con resultados muy irreales. No se ha podido esclarecer si esos colores habían sido ya agregados a las lajas de piedra originales (¿falsificación?) o fueron incorporados para hacer más vistosas las láminas. En la Figura 3a (tomada de Knorr, 1755) se ilustra el ejemplo de un camarón fóssil sobre una placa probablemente procedente del área de Cerín, en Francia (de donde proviene el pez rodeado de dendritas que se presenta en la Figura 6) y en la Figura 3b, diseños dendríticos acerca de los cuales el autor (Wirsing, 1755) señala que en parte simula una isla de la cual, como en los *Campi Flegrei* [un supervolcán, cerca de Nápoles, Italia] ascienden nubes y vapores y agrega que de la imaginación de cada uno pueden surgir interpretaciones variadas...

En la transición del siglo XVIII al XIX los coleccionistas comienzan a adoptar los criterios establecidos por los mineralogistas y los petrógrafos, separando los materiales por su composición y

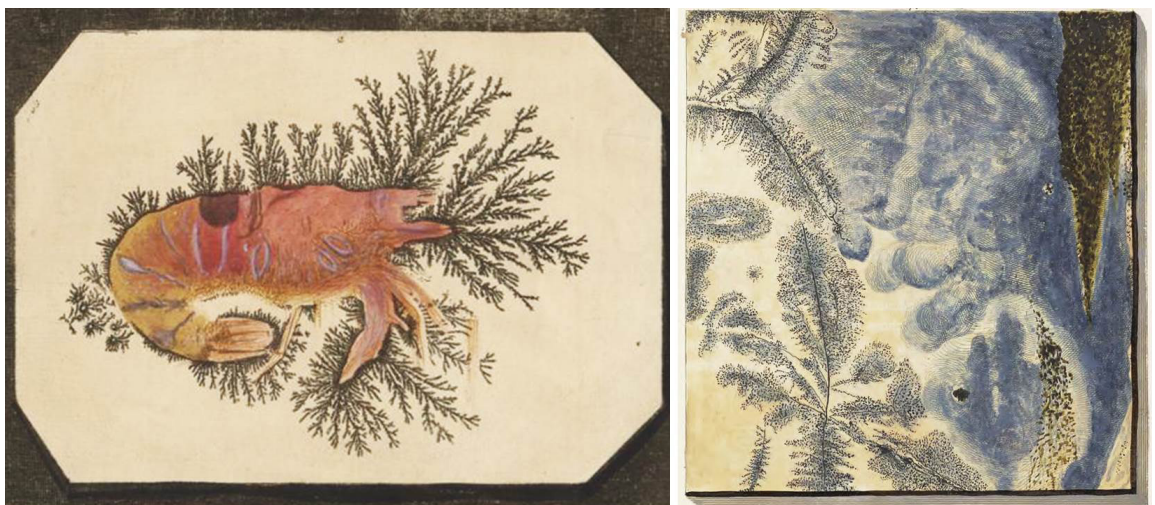


Figura 3. Ilustrações de livros antigos: (a) Dendritos ao redor de um camarão. Retirado de <https://digitale.bibliothek.uni-halle.de/vd18/content/titleinfo/15149460>. (b) Desenhos dendríticos. URL: <https://archive.org/details/inesAliquosLapidesColoribusSvisExprimiCuravitEtEdidit/page/n169/mode/2up>. Ver comentários no texto

Figura 3. Ilustraciones de libros antiguos: a) Dendritas alrededor de un camarón. URL: <https://digitale.bibliothek.uni-halle.de/vd18/content/titleinfo/15149460>. b) Diseños dendríticos. URL: <https://archive.org/details/armoraEtAdfinesAliquosLapidesColoribusSvisExprimiCuravitEtEdidit/page/n169/mode/2up>. Véanse los comentarios en el texto

nador F. Corsi, que em 1825 publicou um extenso e muito interessante “*Catálogo Ragionato*”, no qual aparecem várias amostras com dendritos. Em 1867 em Paris e em 1869 em Londres, foi publicada a obra de L. L. Simonin, intitulada “*La Vie Souterraine, ou Mines et Les Mineurs*”.

Em meados do século XIX, em sua obra “*Elements of Mineralogy and Geology*”, originalmente publicada em alemão, F. Schoedler faz uma referência muito breve, mas interessante, aos dendritos. Afirma:

Frecuentemente encontramos vestígios que se assemelham a árvores ou musgos entre as lajes ou placas de pedra, formando dendritos ser facilmente imitados; podemos ilustrar sua origem se colocarmos argila bem selecionada entre duas placas de vidro ou pedra e a pressionarmos levemente. Dessa forma, uma variedade de desenhos ramificados será obtida, semelhante às formações mais difíceis que aparecem na natureza, que podem ser facilmente confundidas com musgos petrificados ou outros objetos de plantas (tradução nossa, da p.56 da edição em inglês de Schoedler, 1851).

Infelizmente, o autor não faz qualquer referência à Mineralogia, mas inclui interessante observação experimental, que foi posteriormente reivindicada. Um pouco mais tarde, em 1880, H. C. Lewis propõe que os dendritos não são gerados pela infiltração das águas superficiais, mas crescem de baixo para cima pela ação da água que circula pelos poros e fraturas da rocha e parecem crescer pela adição de crostas sucessivas de óxidos metálicos.

Já no século XX, C. R. Swartzlow (1934) volta ao assunto e propõe como definição que “um dendrito é um depósito natural inorgânico, cujo contorno é semelhante a um crescimento floral, encontrado em um mineral ou rocha” (traduzido pelo autor JSM). Ele argumenta que são diferentes as origens dos dendritos bidimensionais e tridimensionais e considera que são estruturas formadas próximo à superfície pela circulação das águas subterrâneas, que dissolvem minerais nas rochas e os precipitam não muito longe dali, devido ao efeito da evaporação, gerando, sob certas condições, figuras dendriformes e outros cristais. Ele realiza inúmeras experiências de cristalização em laboratório para apoiar suas observações e afirmações. O assunto parece ter deixado de ser de grande interesse para a comunidade geológica pelo resto do século, até que, nas últimas décadas, a irrupção quase explosiva da pesquisa sobre dimensões fractais na natureza coloca velhas formas parecidas com árvores em primeiro plano e são retomadas algumas linhas de

por su clasificación genética. Se destaca entre ellos el coleccionista F. Corsi que en 1825 publica un extenso y muy interesante “*Catálogo Ragionato*” de la misma en la que aparecen varias muestras con dendritas. En 1867 en Paris, y en 1869 en Londres, se publica la obra de L. L. Simonin titulada “*La Vie Souterraine, ou Mines et Les Mineurs*”.

A mediados del siglo XIX, en su obra “*Elements of Mineralogy and Geology*” publicada originalmente en alemán, F. Schoedler hace una muy breve pero interesante referencia a las dendritas. Dice allí:

Frecuentemente encontramos trazos que asemejan árboles o musgos entre las lajas o placas de roca, formando dendritas que pueden ser muy fácilmente imitadas e ilustrado su origen si se coloca arcilla bien seleccionada entre dos placas de vidrio o piedra y presionarlas ligeramente. Se obtendrá así una variedad de diseños ramificados, similares a las formaciones más duras que aparecen en la naturaleza, las que pueden ser fácilmente confundidas con musgos petrificados u otros objetos vegetales (traducción nuestra de la p.56 de la edición inglesa de Schoedler, 1851).

Lamentablemente no agrega ninguna referencia a la mineralogía pero la interesante observación experimental que hace constar ha sido reivindicada posteriormente. Algo más tarde, en 1880, H.C. Lewis propone que las dendritas no se generan por la filtración de aguas superficiales, sino que crecen de abajo hacia arriba por la acción del agua que circula por los poros y fracturas de la roca y que parecen crecer por la adición de sucesivas crostas de óxidos metálicos.

Ya en el siglo XX, C.R. Swartzlow (1934) vuelve sobre el tema y propone como definición que “Una dendrita es un depósito natural inorgánico, cuyo contorno es semejante a un crecimiento floral, que se encuentra en un mineral o roca” (traducido por el autor JSM). Sostiene que los orígenes de las dendritas bidimensionales y las tridimensionales son diferentes y considera que son estructuras formadas cerca de la superficie por la circulación de aguas subterráneas que disuelven los minerales de las rocas y, no lejos de allí, por efecto de la evaporación, vuelven a precipitarlos generando, bajo determinadas condiciones las figuras dendriformes y en otras cristales. Realiza numerosas experiencias de cristalización en laboratorio para sostener sus observaciones y afirmaciones. El tema parece haber dejado de interesar mayormente a la comunidad geológica durante el resto del siglo hasta que, ya en las últimas décadas, la irrupción casi explosiva de la investigación de

pesquisa. Numerosas publicações se dedicam ao tema (como por exemplo Chopard et al., 1991, Halsey, 2000); algumas delas serão mencionadas mais adiante.

De que são feitos?

Embora sejam tradicionalmente chamados de “dendritos de manganês” ou “dendritos de pirolusita”, na verdade não são compostos de manganês metálico ou pirolusita (óxido de manganês, MnO_2), mas de óxidos mais complexos, como os minerais romanecita (que, além de manganês e oxigênio, possui bário) e holandita (em que bário, potássio, sódio e algum chumbo são adicionados a manganês e oxigênio). Uma característica importante dos dendritos é serem muito pequenas as partículas do material que constitui o filme de óxido. Às vezes, são aglomerações coloidais, partículas cujo diâmetro está entre um micrômetro (um milionésimo de metro) e um nanômetro (um bilionésimo de metro), desprovidos de estrutura cristalina; às vezes são associações de microcristais invisíveis a olho nu ou às vezes são cristais muito pequenos, porém discerníveis. Contudo, não apenas os óxidos de manganês podem originar dendritos; também existem dendritos de óxido de ferro e até dendritos metálicos, como os reproduzidos na Figura 4a. Processos de solidificação e fusão de ligas metálicas também geram dendritos e há muitos exemplos obtidos por esse meio, um dos quais é ilustrado na Figura 4b.

As dimensões fractais na natureza põe em primeira linha a las viejas formas arborescentes y se retoman algunas líneas de investigación, dedicándose al tema numerosas publicaciones (Chopard et al., 1991 y Halsey, 2000; por ejemplo) y otras de las cuales algunas serán mencionadas más adelante.

¿De qué están hechas?

Si bien tradicionalmente se las llama “dendritas de manganeso” o “dendritas de pirolusita” en realidad no están compuestas por manganeso metálico ni tampoco por *pirolusita* (óxido de manganeso, MnO_2), sino por óxidos más complejos, como los minerales *romanecita* (que además de manganeso y oxígeno tiene bario) y *hollandita* (en el que bario, potasio, sodio y algo de plomo se suman al manganeso y al oxígeno). Una característica importante de las dendritas es que las partículas del material que forma la película de óxidos son muy pequeñas. Se trata a veces de aglomeraciones de **coloides**, partículas cuyo diámetro se encuentra entre un micrón (la millonésima parte del metro) y un nanómetro (la milmillonésima parte del metro), que no presentan estructura cristalina, a veces de asociaciones de **microcristales** no apreciables a ojo desnudo y a veces de cristales muy pequeños pero discernibles. Pero no sólo los óxidos de manganeso pueden originar dendritas, existen también dendritas de óxidos de hierro e incluso dendritas metálicas como las que se reproducen en la Figura 4a. Los procesos de solidificación y de fusión de aleaciones



Figura 4. (a) Dendritos de cobre de White Pine, Michigan, EUA. Foto Julio Landmann. (b) Dendritos de zinco desenvolvidos em uma massa parcialmente derretida de zinco impuro. Fonte: URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/dendrites.html>

Figura 4. (a) Dendritas de cobre procedentes de White Pine, Michigan, USA. Foto Julio Landmann. (b) Dendritas de zinc desarrolladas en una masa de zinc impuro parcialmente fundida (URL: <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/dendrites.html>)

Cristais de gelo são outro exemplo bem conhecido de dendrito tridimensional, embora eles tendam a desenvolver formas planas e se caracterizam por linhas retas que se abrem em ângulos constantes de 120°, como pode ser visto na Figura 5a. A presença de inclusões dendríticas tridimensionais de óxido de ferro ou manganês e possivelmente outros minerais em uma massa de sílica transparente ou esbranquiçada dá origem às chamadas “ágatas musgosas” de grande interesse para joias e coleções de minerais; um magnífico exemplo é reproduzido na Figura 5b, na qual podem ser vistos dendritos tridimensionais formados por natrolita e outros minerais, imersos em calcedônia (uma variedade de sílica).

As figuras 1a, 2, 3 e 6a ilustram dendritos desenvolvidos em planos de camadas e também em superfícies de fratura. Também é comum que apareçam em associação com a superfície de contato entre fósseis e planos de estratificação, como exemplificado na Figura 6b, na qual podem ser vistos pequenos dendritos formados no contato entre a barbatana de um peixe e o material hospedeiro. As Figuras 4a e 4b e 5b são de dendritos tridimensionais. O caso dos cristais de gelo ilustrados na Figura 5a tem a particularidade de que, embora sejam cristais tridimensionais com espessura apreciável, eles se desenvolvem preferencialmente em um único plano.

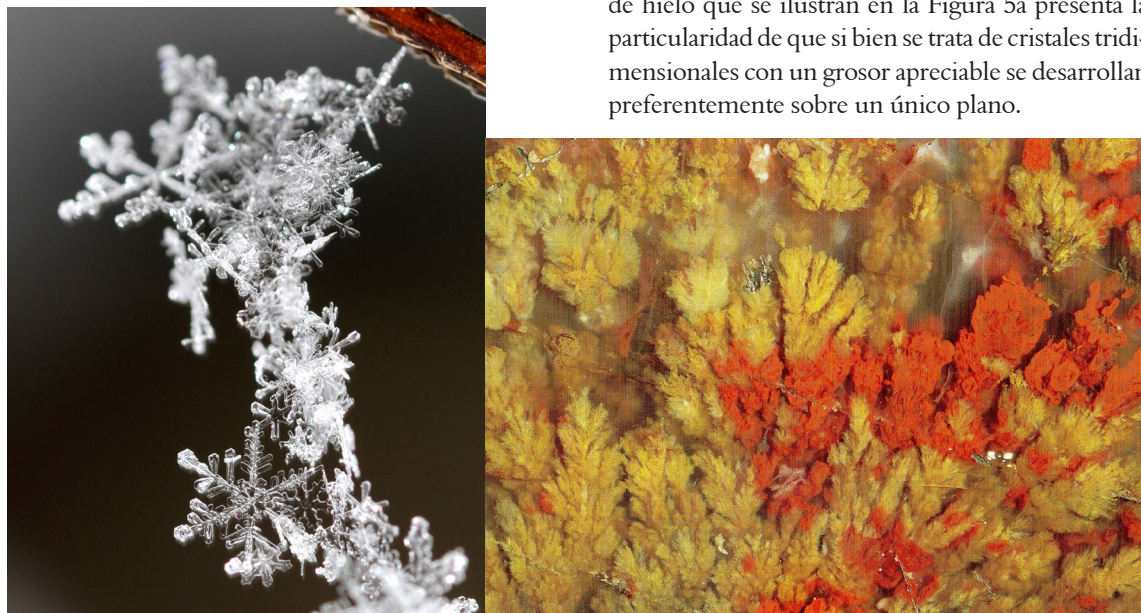


Figura 5. (a) Cristais de gelo. Observe o desenvolvimento dos seis ramos principais dos quais novos ramos sempre emergem em ângulos constantes (Detalhe da fotografia de T. Bresson em [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ComputerHotline_-_Snow_crystals_\(by\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ComputerHotline_-_Snow_crystals_(by).jpg)) (b) Detalhe de uma ágata musgosa (extraída de Macpherson, 1989)

Figura 5.(a) Cristales de hielo. Obsérvese el desarrollo de las seis ramas principales de las que surgen nuevas ramas siempre con ángulos constantes (Detalle de la fotografía de T. Bresson en [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ComputerHotline_-_Snow_crystals_\(by\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ComputerHotline_-_Snow_crystals_(by).jpg)). (b) Detalle de un ágata musgosa (Tomado de: Macpherson, 1989)

metálicas también generan dendritas y son muchos los ejemplos obtenidos por este medio, uno de los cuales se ilustra en la Figura 4b.

Los cristales de hielo son otro ejemplo muy conocido de dendritas tridimensionales, si bien tienden a desarrollar forma plana y están caracterizadas por trazos rectos que van abriéndose unos de otros en ángulos constantes de 120° tal como puede verse en la Figura 5a. La presencia de inclusiones dendríticas tridimensionales de óxido de hierro o de manganeso y eventualmente de otros minerales en una masa de sílice transparente o blanquecina da origen a las denominadas “ágatas musgosas” de gran interés en joyería y para el coleccionismo de minerales, un magnífico ejemplo de las cuales se reproduce en la Figura 5b, en la que pueden verse, inmersas en calcedonia (una variedad de sílice), dendritas tridimensionales formadas por natrolita y otros minerales.

Las Figuras 1a, 2, 3 y 6a corresponden a dendritas que se desarrollan sobre planos de estratificación y también sobre superficies de fractura. Es habitual también que aparezcan en asociación a la superficie de contacto entre los fósiles y el plano de estratificación, tal como ejemplifica en la Figura 6b, en la que puede verse pequeñas dendritas que se han formado en el contacto entre la aleta de un pez y el material hospedante. Las Figuras 4a y 4b y 5b corresponden a dendritas tridimensionales. El caso de los cristales de hielo que se ilustran en la Figura 5a presenta la particularidad de que si bien se trata de cristales tridimensionales con un grosor apreciable se desarrollan preferentemente sobre un único plano.

O desenho dendriforme e sua descrição matemática

O termo “fractal” tornou-se moda algumas décadas atrás, mas é um conceito que já havia sido desenvolvido e até reconhecido na natureza e na arte. Fractal resulta da contração das palavras em inglês traduzidas como expoente fracionário. Figuras dendriformes são um dos muitos desenhos fractais existentes e isso permitiu que fossem descritas matematicamente usando fórmulas adequadas, como primeiro passo para simular sua formação. O exemplo mais comum de fractalidade corresponde à repetição de um desenho em si mesmo em escalas diferentes (como em samambaias verdadeiras), mas é importante notar que a fractalidade recobre muitos outros campos e situações.

Uma característica a ter em mente é que alguns dendritos exibem crescimento claramente controlado pela estrutura cristalina e pelas leis que a regulam, dando origem a padrões dendríticos cristalinos, como seria o caso dos cristais de gelo, enquanto outros não exibem controle direcional claro em seu crescimento, sendo chamados de padrão dendrítico aleatório; esse é o caso da maioria deles. Também é importante ressaltar que arranjos semelhantes podem ser obtidos por diferentes processos naturais e, sendo esse o caso dos dendritos, no próximo item será feita referência a eles. Para concluir, digamos que nem todos os dendritos respondem a padrões fractais, uma vez

El diseño dendriforme y su descripción matemática

Si bien el término “fractal” (contracción de las palabras inglesas que se traducen como *exponente fraccionario*) se puso de moda hace unas pocas décadas el concepto ya había sido desarrollado anteriormente e incluso reconocido tanto en la naturaleza como en el arte. Las figuras dendriformes son uno de los tantos diseños fractales existentes y eso ha permitido describirlas matematicamente mediante fórmulas adecuadas, lo que ha constituido el primer paso para la simulación de su formación. El ejemplo más común de fractalidad corresponde a la repetición de un mismo diseño sobre sí mismo a diferentes escalas (como en los verdaderos helechos) pero es importante señalar que la fractalidad abarca muchos otros campos y situaciones.

Una característica a tener en cuenta es que algunas dendritas muestran un crecimiento claramente controlado por la estructura cristalina y las leyes que la regulan, dando lugar a patrones *dendríticos cristalinos*, como sería el caso de los cristales de hielo, mientras otras no exhiben un control claro direccional en su crecimiento, denominándose este patrón *dendrítico aleatorio*, como sería el caso de la mayoría de ellas. Es importante señalar, además, que diseños similares pueden ser obtenidos por diferentes procesos naturales y, siendo este el caso de las dendritas, en el próximo ítem se hará referencia a ellos. Digamos para finalizar que no todas

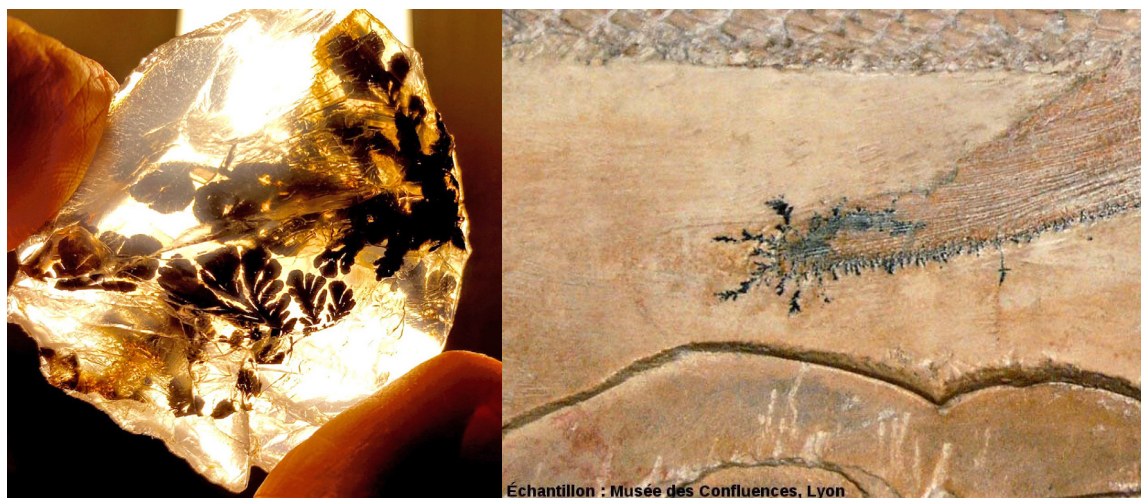


Figura 6. Dendritos de manganês: (a) Nos planos de fratura em cristal de quartzo de Minas Gerais, Brasil. Foto Julio Landmann. (b) Associado a uma superfície de contato entre uma barbatana de peixe fóssil e a matriz. URL: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/Images/Img309/309-dendrites-fossiles-Cerin-09.jpg>

Figura 6. Dendritas de Manganeso. (a) Sobre planos de fratura em um cristal de cuarzo proveniente de Minas Gerais, Brasil. Foto Julio Landmann. (b) Asociadas a la superficie de contacto entre la aleta de un pez fóssil y la matriz. URL: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/objets/Images/Img309/309-dendrites-fossiles-Cerin-09.jpg>

que estes, para se formar, exigem condições particulares que nem sempre são atendidas, mesmo quando são atendidas as condições necessárias para originar dendritos. Assim, pode haver depósitos de manganês com aspecto dendriforme, mas que não respondem necessariamente a um desenho fractal.

Como se originam?

Propostas sobre mecanismos físico-químicos que dão origem a formas tão curiosas quanto variadas dos dendritos devem levar em consideração algumas características fundamentais:

- Geralmente se desenvolvem em formato bidimensional em descontinuidades planas que afetam as rochas, mas também podem fazê-lo em formato tridimensional, gerando dendritos de espessura significativa que requerem espaços “abertos”, não confinados entre duas superfícies vizinhas.
- São constituídos por partículas extremamente pequenas, aglomerados coloidais ou microcristais.
- O mecanismo deve diferenciar se são partículas que existiam anteriormente no fluido e que são depositadas ao se alterar o regime de fluxo, ou se são formadas e depositadas *in situ* (esse critério parece prevalecer nos modelos propostos pelos diferentes autores que se dedicaram ao tema).

Com essas restrições em mente, dois processos foram propostos: **Crescimento ou Adição Limitada por Processos de Difusão** (DLA para o nome em inglês “*Diffusion-Limited Aggregation*”) e **Interdigitação Viscosa** (VF para “*Viscous Fingering*”). Embora os nomes pareçam complexos, é possível esboçar uma explicação simples, que será desenvolvida no próximo item.

Adição limitada por difusão

O processo pressupõe a existência de um líquido que contém as partículas coloidais ou microcristais em suspensão, alojados em uma fina fissura na rocha. Uma partícula age como semente e o movimento aleatório das outras partículas dentro da camada líquida faz com que, ao longo do tempo, elas colidam com a primeira e, como não podem se separar novamente, ocorra o crescimento do conjunto. O crescimento é con-

las dendritas respondem a padrões fractais, pois estes requerem condições particulares para formarse, las que no siempre se cumplen aun cuando se cumplan las necesarias para la formación de dendritas. Así, puede haber depósitos de manganeso de aspecto dendriforme pero que no necesariamente responden a un diseño fractal.

¿Cómo se generan?

Las propuestas acerca de los mecanismos físico-químicos que dan origen a formas tan curiosas como variadas deben tener en cuenta las características fundamentales de las dendritas:

- se desarrollan generalmente en forma bidimensional en discontinuidades planas que afectan a las rocas, pero también pueden hacerlo en forma tridimensional, generando dendritas de espesor importante que requieren espacios “abierto”, no confinados entre dos superficies próximas.
- están formadas por partículas de tamaño extremadamente pequeño, aglomerados de coloides o microcristales.
- el mecanismo debe diferenciar si se trata de partículas que existían previamente en el fluido y que son depositadas al cambiar el régimen de flujo o se forman y depositan *in situ* (este criterio parece primar en los modelos propuestos por los diferentes autores que se han ocupado del tema).

Con estos condicionantes en mente se han propuesto dos procesos: el **crecimiento o adición limitados por procesos de difusión** (DLA por su nombre en inglés “*diffusion-limited aggregation*”) y la **digitación viscosa** (VF por “*viscous fingering*”). Si bien los nombres suenan muy complejos se puede intentar una explicación sencilla de ellos, la que se desarrollará en el próximo ítem.

Adición limitada por difusión

En este proceso se asume la existencia de un líquido que contiene las partículas coloidales o microcristales en suspensión, el que se encuentra alojado en una delgada fisura de la roca. Una partícula actúa como semilla y el movimiento aleatorio de las otras partículas en el seno de la capa líquida hace que, a lo largo del tiempo, vayan chocando con la primera y, al no poder separarse nuevamente, se produce el crecimiento del conjunto. Este crecimen-

trolado por uma série de parâmetros relacionados a: (a) composição do líquido e dos coloides; (b) temperatura; (c) pressão etc. Certas propriedades do composto químico coloidal determinam algumas direções preferenciais de crescimento, dando origem a ramos. No caso dos microcristais, a orientação dos ramos é imposta pelas características da estrutura cristalina. Como o movimento das partículas que estão em suspensão no líquido é em zigue-zague e aleatório, cada uma delas terá mais possibilidades de colidir primeiro com as que estão nas partes mais externas dos galhos, ou seja, mais afastadas do centro; por essa razão, os espaços mais próximos ao núcleo original se mantêm vazios. O processo se repete em escala diferente em determinados pontos dos galhos, que se transformam em novas sementes que geram, em menor escala, figuras iguais às maiores, formando o desenho ramificado.

Interdigitação Viscosa

O segundo processo, por outro lado, assume a existência de dois líquidos imiscíveis, um deles de menor viscosidade, sendo injetado no outro. O líquido que é injetado abre “canais” em todas as direções dentro do que o cerca e os canais se ramificam, gerando o desenho característico de folhas com vários lobos. O contato (interface) entre os dois fluidos é de natureza instável e se desloca, gerando padrões do tipo fractal com base nos gradientes de pressão que se originam nas proximidades da interface. A verificação experimental do modelo é realizada em uma célula Hele-Shaw, composta por duas placas planas separadas por uma distância muito pequena (uma fração de milímetro entre um par delas), na qual um fluido é introduzido. Através de um orifício apropriado, outro fluido com viscosidade mais baixa é injetado. A interdigitação é explicada como produto do aparecimento de instabilidades que geram protuberâncias; nas proximidades destas ocorre um aumento na velocidade do fluido como resultado da formação de um gradiente de pressão. O aumento da velocidade do fluido permite que a protuberância se projete e aumente o tamanho, resultando em *feedback* do processo, aumento do tamanho, aumento da velocidade do fluido, aumento adicional do tamanho e assim por diante. O processo retroalimentado é então repetido nas instabilidades que surgem nas paredes de cada novo canal à medida que cresce. Nesse mecanis-

to está controlado por uma serie de parâmetros que tienen que ver con: (a) la composición del líquido y de los coloides; (b) la temperatura; (c) la presión; etc. Ciertas propiedades del compuesto químico coloidal determinan algunas direcciones preferenciales del crecimiento, dando origen a las ramas. En el caso de microcristales, la orientación de las ramas está impuesta por las características de la red cristalina. Como el movimiento de las partículas que se encuentran en suspensión en el líquido es zigzagueante y aleatorio, cada una de ellas tendrá más posibilidades de chocar primero con las que estén en las partes más externas de las ramas, es decir más lejos del centro, por lo que se conservan vacíos los espacios más cercanos al núcleo original. El proceso se repite a una escala diferente sobre determinados puntos de las ramas, que se convierten así en nuevas semillas que generan, en pequeño, figuras iguales a las mayores, formándose así el diseño ramificado.

Digitación viscosa

El segundo proceso, por su parte, supone la existencia de dos líquidos inmiscibles, inyectándose el de menor viscosidad en el otro. El líquido que se inyecta abre “canales” en todas las direcciones dentro del que lo rodea y estos canales se bifurcan generando el diseño característico de hojas multilobuladas. El contacto (interfase) entre ambos fluidos es de carácter inestable y se desplaza generando diseños de tipo fractal en función de los gradientes de presión que se originan en las inmediaciones de la interfase. La comprobación experimental del modelo se realiza en una celda de Hele-Shaw, constituida por dos placas planas separadas por una distancia muy pequeña (una fracción de milímetro a un par de ellos) en la que se coloca un fluido en el que luego, a través de un orificio apropiado, se inyecta otro fluido de viscosidad menor. La digitación se explica como producto de la aparición de inestabilidades que generan protuberancias en cuyas adyacencias se produce un aumento de la velocidad del fluido como consecuencia de la aparición de un gradiente de presión. El aumento de velocidad del fluido permite que la protuberancia se proyecte y aumente su tamaño, lo que produce una retroalimentación del proceso, mayor tamaño, mayor velocidad del fluido, aumento adicional del tamaño y así sucesivamente. Este proceso retro-alimentado se repite luego en las inestabilidades que surgen en las paredes de cada nuevo canal a medida que crece. En este mecanismo la forma estaría predetermina-

mo, a forma seria predeterminada pelo meio (os fluidos e a interface entre eles, e não pelo mecanismo de agregação de partículas ao substrato). Exemplos deste tipo de crescimento são ilustrados na Figura 7. A Figura 7a corresponde a uma concreção de pirita discoidal, do tipo chamado “sol” ou “dólar”, de Sparta (Illinois, EUA), onde são encontradas amostras de diâmetro excepcional (mais de 20 cm). Em muitas dessas amostras, você pode ver “dedos” formados por camadas de microcristais cuja sobreposição radial gera o disco. A Figura 7b, por sua vez, mostra figuras dendríticas obtidas quando o ar pressurizado é soprado em um filme de óxido de titânio (TiO_2) no estado sol-gel; as cores observadas são uma consequência da polarização da luz pelos materiais.

É importante ter em mente, no entanto, que às vezes é muito difícil estabelecer qual foi o processo que norteou o crescimento de um dendrito específico, uma vez que a mesma forma final pode ser alcançada por qualquer um dos dois processos e, Verificou-se em alguns casos, mudanças nas condições ambientais, na composição do fluido e / ou na velocidade do fluxo podem induzir a mudança no mecanismo de formação. Os dendritos das Figuras 1a, 2 e 6 seriam exemplos de crescimento por adição limitada por difusão, enquanto as Figuras 4b, 5b e 7 seriam de crescimento por dedilhado viscoso. O cristal de gelo na Figura constitui um caso especial de adição limitada por difusão, pois foi formado a partir do vapor de água presente no ar super-resfriado e que na Figura 4a poderia ter sido formado por qualquer um dos dois mecanismos, sendo necessário um estudo muito detalhado do ambiente em que foi formado e de sua textura microscópica para tomar uma decisão a respeito.

E o que a Geologia nos diz?

Até aqui, a análise da origem dos dendritos se concentrou nos processos físico-químicos, mas também é necessário comparar as situações que cada modelo apresenta e os contextos geológicos nos quais os dendritos são encontrados. O primeiro ponto a ter em mente é que, conforme apontado no início, existem dendritos bidimensionais que se desenvolvem em superfícies descontínuas, mas também existem dendritos tridimensionais muito complexos que, sem dúvida, devem ter se desenvolvido no interior de fluidos mais ou menos viscosos. Os ambientes em que foi gerado cada um destes

da por el medio (los fluidos y la interfase entre los mismos, y no por el mecanismo de agregación de las partículas al sustrato). En la Figura 7 se ilustran ejemplos de este tipo de crecimiento. La Figura 7a corresponde a una concreción discoidal de pirita, del tipo denominado “sol” o “dólar”, proveniente de Sparta (Illinois, USA), donde se encuentran ejemplares de diámetro excepcional (más de 20cm). En muchos de estos ejemplares pueden verse “dedos” formados por camadas de microcristales cuya superposición radial genera el disco. La Figura 7b, por su parte, muestra figuras dendríticas obtenidas cuando se insufla aire a presión en una película de óxido de titanio (TiO_2) en estado sol-gel, siendo los colores que se observan consecuencia de la polarización de la luz en los materiales.

Es importante tener en cuenta, sin embargo, que es a veces muy difícil establecer cuál ha sido el proceso que ha guiado el crecimiento de una dendrita en particular, ya que una misma forma final puede ser alcanzada por cualquiera de los dos procesos y, se ha comprobado en algunos casos, cambios en las condiciones ambientales, en la composición del fluido y/o en la velocidad del flujo pueden inducir el cambio en el mecanismo de formación. Las dendritas de las Figuras 1a, 2 y 6 serían ejemplos de crecimiento por adición limitada por difusión, mientras que las Figuras 4b, 5b y 7 lo serían del crecimiento por digitación viscosa. El cristal de hielo de la Figura constituye un caso especial de adición limitada por difusión en cuanto se ha formado a partir del vapor de agua presente en el aire sobre-enfriado y la de la Figura 4a podría haberse formado por cualquiera de los dos mecanismos, siendo necesario un estudio muy detallado del ambiente en que se formó y de su textura microscópica para tomar una decisión al respecto.

¿Y la Geología, qué nos dice?

Hasta aquí el análisis del origen de las dendritas se ha centrado en los procesos físico-químicos, pero es necesario también realizar una comparación entre las situaciones que cada modelo plantea y los contextos geológicos en los que se encuentran las dendritas. El primer punto a tener en cuenta es que, como se ha señalado al comienzo, hay dendritas bidimensionales que se desarrollan sobre superficies de discontinuidad, pero también hay dendritas tridimensionales muy complejas que, sin duda, han debido desarrollarse en el seno de fluidos más o menos viscosos. Los ambientes en que cada uno de estos tipos se ha gene-

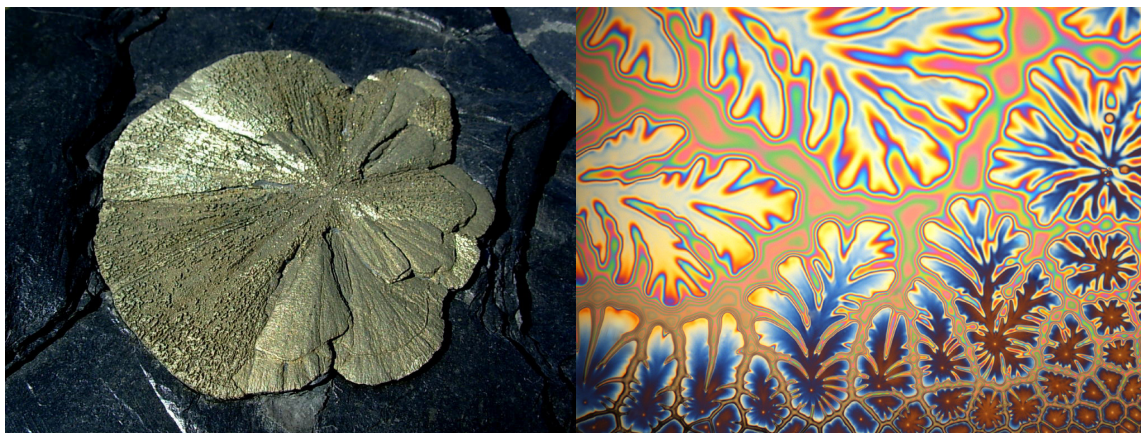


Figura 7. a) Concreção de pirita discoidal no teto de uma mina de carvão em Illinois (EUA). URL: https://www.spiritrockshop.com/Pyrite_Suns.html. b) Padrões dendríticos formados pela injeção de um fluido em um mais viscoso. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Viscous_fingers_in_a_TiO2_sol-gel_thin_film_formed_from_a_Saffman-Taylor_instability._200x_magnification_reflected_light.tif

Figura 7. (a) Concreción discoidal de pirita en el techo de una mina de carbón en Illinois (USA). URL: https://www.spiritrockshop.com/Pyrite_Suns.html. (b) Diseños dendríticos formados al inyectar un fluido en otro más viscoso. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Viscous_fingers_in_a_TiO2_sol-gel_thin_film_formed_from_a_Saffman-Taylor_instability._200x_magnification_reflected_light.tif

tipos devem ter sido, sem dúvida, diferentes dos dendritos bidimensionais, que exigem soluções que circulam pelos poros e fraturas entre as rochas e que, por evaporação ou contato com materiais ou soluções quimicamente reativas, depositam o material que elas carregavam em solução. Os dendritos tridimensionais requerem a intrusão de um fluido em outro e, para isso, o espaço necessário deve ser gerado no fluido que está sendo invadido (que pode ser um sedimento saturado por água e ainda não consolidado). Além das muitas condições a serem atendidas, a onipresença dos dendritos ao longo do Tempo Geológico e sua ampla distribuição geográfica mostram que tais condições ocorrem com frequência, embora nem sempre sejam ideais ou tenham perdurado por tempo suficiente para gerar amostras excepcionais.

Geração experimental de dendritos

Em vários trechos do trabalho, foram mencionados métodos experimentais que geraram cristais dendríticos ou figuras dendriformes e que tiveram grande importância no estudo dos mecanismos que levam à sua formação. As experiências podem ser de diferentes tipos: cristalização do soluto por evaporação do solvente, cristalização em um suporte de vapor supersaturado, injeção de líquido em um líquido mais viscoso, em uma célula Hele-Shaw, separação abrupta de placas unidas por material viscoso, crescimento asso-

rado han debido ser, sin duda, diferentes que para las dendritas bidimensionales requiere soluciones que circulan a través de los poros y las fracturas entre las rocas y que al evaporarse o al entrar en contacto con materiales o soluciones químicamente reactivas depositan el material que llevaban en solución. Las dendritas tridimensionales requieren la intrusión de un fluido en otro y para ello debe generarse el espacio necesario en el fluido que es intruído (que puede ser sedimento saturado de agua y aún no consolidado). Más allá de las muchas condiciones a cumplir, la omnipresencia de las dendritas a lo largo del tiempo geológico y su amplia distribución geográfica ponen de manifiesto que esas condiciones se dan con frecuencia, aunque no siempre sean las ideales ni se mantengan el tiempo suficiente como para generar ejemplares excepcionales.

Generación experimental de dendritas

En varias oportunidades a lo largo de este trabajo se mencionaron métodos experimentales que generan cristales dendríticos o figuras dendriformes que resultaron de gran importancia en los estudios de los mecanismos que conducen a su formación. Estas experiencias pueden ser de diferentes tipos: cristalización del soluto por evaporación del solvente, cristalización sobre un soporte desde un vapor sobresaturado, inyección de un líquido en otro más viscoso en una celda Hele-Shaw, separado brusco de placas unidas por un material visco-

ciado a processos de hidrólise, crescimento por super-resfriamento de ligas metálicas ou material rochoso fundidos. Nesta seção, descreveremos detalhadamente três procedimentos, facilmente executáveis sem necessidade de instrumentos especializados que servirão, como declarado na introdução, não apenas para visualizar o crescimento e a forma dos dendritos, mas, acima de tudo, para que os alunos se familiarizem com a metodologia de experimentação e reflexão daqueles que se dedicam à ciência.

Cultivo de cristais dendriformes

Os cristais dendriformes mais conhecidos são aqueles que se formam por congelamento da água, os chamados cristais de gelo de braços retos e de forma regular, como os mostrados na Figura 5a. O site <http://www.snowcrystals.com/> contém informações sobre formação de cristais e atividades educacionais. Os vídeos que registram o crescimento de formas dendríticas hexagonais são altamente ilustrativos do processo. A URL <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/project/project.htm> descreve um modo simples e barato de cultivá-los, cuja maior dificuldade reside na obtenção de gelo seco (dióxido de carbono sólido) para gerar as temperaturas necessárias. Reyero-Cortiña et al. (2008) descrevem conceitos básicos de cristalização e sugerem procedimentos para obter, por métodos simples, cristais com várias formas, incluindo dendritos. Com o objetivo de obter dendritos de naftaleno por meio de um procedimento simples, mas que requer cuidados na sua realização.

Para aqueles que desejam expandir seus conhecimentos sobre a formação de cristais em geral, sempre em nível introdutório, há uma bibliografia muito extensa acessível na Internet, começando com Mayayo & Yuste (2018).

Geração por injeção de um líquido em outro mais viscoso

Nesse caso, é necessário um dispositivo chamado “célula Hele-Shaw”, que consiste essencialmente de duas placas de vidro ou plástico transparente sobrepostas e levemente separadas e líquidos de viscosidade diferente que são injetados sequencialmente entre as placas por meio de uma seringa pequena. As dimensões das placas podem ser de 15 cm x 15 cm por 3-5 mm

so, crescimento associado a procesos de hidrólisis, crecimiento por sobre-enfriado de fundidos de aleaciones metálicas y de fundidos de materiales rocosos. En este apartado describiremos con algo de detalle tres procedimientos, fácilmente realizables sin necesidad de instrumental especializado que servirán, como se ha dicho en la introducción, no sólo para visualizar el crecimiento y forma de las dendritas sino, sobre todo, para que los estudiantes se familiaricen con la metodología de experimentación y reflexión de quienes se dedican a la ciencia.

Cultivo de cristales dendriformes

Los cristales dendriformes más conocidos son los que se forman por congelación del agua, los llamados cristales de hielo de brazos rectos y formas regulares, como los que se muestran en la Figura 5a. El sitio <http://www.snowcrystals.com/> contiene información acerca de la formación de los cristales y actividades educativas. Los videos que registran el crecimiento de las formas dendríticas hexagonales son sumamente ilustrativos del proceso.

En <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/project/project.htm> se describe una forma sencilla y económica de cultivarlos, cuya máxima dificultad radica en la obtención del hielo seco (dióxido de carbono sólido) para generar las temperaturas necesarias. En Reyero-Cortiña et al. (2008) se describen conceptos básicos de cristalización y se sugieren los procedimientos para obtener cristales con diversas formas, incluidas las dendritas, por métodos simples. Proponiéndose la obtención de dendritas de naftaleno mediante un procedimiento sencillo pero que requiere cuidado en su realización.

Para quienes deseen ampliar sus conocimientos sobre la formación de cristales en general, siempre dentro de un nivel introductorio existe una muy amplia bibliografía accesible en la Internet, pudiendo comenzar por Mayayo y Yuste (2018).

Generación por inyección de un líquido en otro más viscoso

Es este caso se requiere un dispositivo denominado “celda de Hele-Shaw” que consiste esencialmente en dos placas de vidrio o plástico transparente superpuestas y ligeramente separadas y líquidos de diferente viscosidad que son inyectados secuencialmente entre las placas mediante una jeringa pequeña. Las dimensiones de las placas pueden ser de 15 cm x 15 cm por 3-5 mm y la separación entre

e a separação entre elas de 2 mm a 3 mm. Para conseguir a separação, podem ser utilizadas tiras de papelão de 1 cm de largura, sobrepostas até que seja alcançada a separação desejada, que são colocadas na periferia, pressionando o conjunto com cliques de papel para manter a unidade do conjunto. Avilés & Aballay (2004) usam glicerina na qual injetam água (que colore com algumas gotas de tinta para obter resultados visualmente mais atraentes). A injeção pode ser feita por meio de um orifício central na placa superior ou a partir de uma das bordas. Primeiro, o líquido mais viscoso é injetado (que desloca o ar entre as placas e gera uma mancha mais ou menos circular) e depois o outro é injetado, o que gera desenhos dendríticos, ao percorrer o líquido anterior. A quantidade e a complexidade dos projetos obtidos serão função dos contrastes de viscosidade e da separação entre as placas, o que exigirá alguma tentativa e erro para alcançar os resultados desejados. É interessante notar, ao fazer a experiência, que quando o fluido mais viscoso é injetado no ar entre as placas, o fenômeno da formação de dendritos não ocorre porque o requisito básico da experiência não é atendido, ou seja, o fluido de menor viscosidade é aquele que pressiona o outro para ocupar o espaço.

Uma variação da experiência foi criada por García-Ruiz et al. (1994), que usam três pequenas placas de vidro (3 cm x 3 cm x 5 mm) separadas por filmes finos de pasta de dente, fixam o conjunto com cliques desses utilizados para papéis e mergulham o conjunto em uma suspensão coloidal de hidróxido de manganês e hidróxido de ferro. Ao fraturar o vidro com um golpe de martelo, o líquido entra através das fraturas e em poucos minutos são gerados dendritos na superfície de contato entre o vidro e a pasta.

Geração por descolamento brusco de duas placas unidas por um fluido viscoso

A experiência segue as diretrizes propostas por Shoedler (1851, p. 56) e requer apenas duas placas (aproximadamente 10 cm por 10 cm por 3 a 5 mm de espessura) de material plástico rígido transparente (acrílico, *plexiglass*) e líquidos de diferentes viscosidades. Thomas (2014) obteve resultados muito atraentes usando cola plástica colorida com tinta para dar maior visibilidade ao resultado. A técnica se limita a colocar uma pequena quantidade de

ambas de 2 mm a 3 mm. Para lograr esta separación pueden utilizarse bandas de cartón de 1 cm de ancho superpuestas hasta lograr la separación buscada que son colocadas en la periferia, presionándose el todo con broches para papeles de forma de mantener la unidad del conjunto. Avilés y Aballay (2004) utilizan glicerina en la que inyectan agua (que colorean con unas gotas de tinta para lograr resultados más atractivos visualmente). La inyección puede hacerse desde un orificio central en la placa superior o desde uno de los bordes. Se inyecta primero el líquido más viscoso (que desplaza el aire existente entre las placas y genera una mancha más o menos circular) y luego se inyecta el otro que, al abrirse camino en el seno del anterior va generando los diseños dendríticos. La cantidad y complejidad de los diseños obtenidos será función de los contrastes de viscosidad y de la separación entre las placas, lo que requerirá algo de ensayo y error hasta lograr los resultados deseados. Es interesante destacar al hacer la experiencia que cuando se inyecta el fluido más viscoso en el aire entre las placas el fenómeno de formación de dendritas no tiene lugar porque no se cumple el requisito básico de la experiencia, que sea el fluido de menor viscosidad el que presione sobre el otro para ocupar el espacio.

Una variación de esta experiencia ha sido utilizada por García-Ruiz et al. (1994) quienes utilizan tres placas pequeñas de vidrio (3 cm x 3 cm x 5 mm) separadas por delgadas películas de pasta dental, fijan el conjunto con broches de los que se utilizan para los papeles y sumergen el conjunto en una suspensión coloidal de hidróxido de manganeso e hidróxido de hierro. Al fracturar el vidrio con un golpe de martillo se produce el ingreso del líquido a través de las fracturas y en pocos minutos se generan dendritas en la superficie de contacto entre el vidrio y la pasta.

Generación por despegado brusco de dos placas unidas por un fluido viscoso

Esta experiencia sigue los lineamientos propuestos ya por Shoedler (1851, p. 56) y sólo requiere dos placas (de aproximadamente 10 cm por 10 cm por 3 a 5 mm de espesor) de material plástico rígido transparente (acrílico, *plexiglas*) y líquidos de diferente viscosidad. Thomas (2014) ha obtenido resultados muy vistosos utilizando cola plástica coloreada con tinta para darle mayor visibilidad al resultado. La técnica se reduce a colocar una peque-

fluido viscoso no centro de uma das placas, cobrir o tanque de cola com a outra placa com cuidado para que não fique preso ar entre as placas e a cola e depois pressionar, para obter um filme fino e uniforme. Ao separar rapidamente as duas placas, a entrada repentina de ar na massa de cola viscosa gera padrões dendríticos, que são semelhantes nas duas placas. É interessante observar isso, já que não se trata de que uma parte da cauda permaneça em uma placa e a outra na outra, gerando imagens complementares, mas sim que a cauda é gerada pela intrusão forçada de ar nos canais. O desenho dendrítico varia muito com a viscosidade do material (isso pode ser conseguido espessando ou afinando a cola), com a velocidade de separação das placas e se a separação ocorrer na forma de uma cunha (isto é, levantar a partir de uma extremidade) ou mover o placas sem que percam o paralelismo.

Recursos didáticos na Internet

Esta seção sugere alguns materiais adicionais aos já mencionados, que permitirão expandir conceitos teóricos e também visualizar os processos descritos no corpo do trabalho.

Artigos

Talanquer (1996) apresenta uma descrição dos fractais e inclui uma explicação da formação das figuras geométricas por interdigitação viscosa e adição limitada por difusão.

Experiências práticas

<https://vimeo.com/22212386> mostra o crescimento de dendritos na célula Hele-Shaw combinando ar, água e glicerina.

<https://www.smithsonianmag.com/science-nature/time-lapse-photos-reveal-beauty-metal-crystals-growing-180961539/> mostra o crescimento de cristais metálicos a partir de soluções, em alguns casos com padrões dendríticos muito atraentes.

Simulações matemáticas

<https://www.tumbex.com/fuckyeahfluidynamics.tumblr/posts?page=1&tag=viscous%20fingering> oferece inúmeras imagens e vídeos de formação de dendritos causados pela instabilidade de Saffmann-Taylor associada ao contato entre

ña cantidad del fluido viscoso en el centro de una de las placas, se cubre el depósito de cola con la otra placa con cuidado para que no quede aire atrapado entre las placas y la cola y se presiona para obtener una película delgada y pareja. Al separar velozmente ambas placas, el ingreso brusco de aire en la masa de cola viscosa genera los diseños dendríticos, que son similares en ambas placas. Es interesante observar esto, ya que no se trata de que una parte de la cola quede en una placa y el resto en la otra, generando imágenes complementarias, sino de la intrusión forzada del aire en la cola generando canales. El diseño dendrítico varía ampliamente con la viscosidad del material (esto puede lograrse espesando o diluyendo la cola), con la velocidad de separación de las placas y si la separación tiene lugar en forma de cuña (es decir levantando desde un extremo) o apartando las placas sin que pierdan su paralelismo.

Recursos en la Internet

En esta sección se sugieren algunos materiales adicionales a los ya mencionados que permitirán ampliar conceptos teóricos y también visualizar los procesos descritos en el cuerpo del trabajo.

Artículos

Talanquer (1996) presenta una descripción de los fractales e incluye una explicación de la formación de las figuras geométricas por digitación viscosa y adición limitada por difusión.

Experiencias prácticas

<https://vimeo.com/22212386> muestra el crecimiento de dendritas en la celda de Hele-Shaw combinando aire, agua y glicerina.

<https://www.smithsonianmag.com/science-nature/time-lapse-photos-reveal-beauty-metal-crystals-growing-180961539/> muestra el crecimiento de los cristales metálicos a partir de soluciones, en algunos casos con patrones dendríticos muy atractivos.

Simulaciones matemáticas

<https://www.tumbex.com/fuckyeahfluidynamics.tumblr/posts?page=1&tag=viscous%20fingering> ofrece numerosas imágenes y videos de la formación de dendritas causadas por la inestabilidad de Saffmann-Taylor, asociada al contacto

líquidos imiscíveis.

<https://www.youtube.com/watch?v=h3O1LGe-dBw> e <https://imgur.com/gallery/gMJeV> mostram de um modo muito atraente o crescimento de corpos dendríticos tridimensionais por simulação numérica do processo de difusão limitada.

https://gmr.es/Publications/2020/COKE20/Canabal_EG2020_final.pdf. O artigo explica como se desenvolve um programa para simular o crescimento de dendritos para fins puramente estéticos. Existe um link para um vídeo explicativo.

A título de Epílogo

Este trabalho destina-se principalmente, como já mencionado, a professores de cursos pré-universitários. Foi elaborado não apenas para esclarecer a origem mineral e não-vegetal dos dendritos, mas também para apresentar, em formato de divulgação, as informações que o autor JSM conseguiu obter sobre sua gênese. É importante destacar que, embora existam numerosos trabalhos dedicados ao assunto na área de metalurgia e muitos também na área de produção de petróleo, são poucos os que se aprofundam nas condições geológicas sob as quais os dendritos se originaram, um aspecto que parece ter sido subvalorizado, tanto pela abundância, quanto pelo desconhecimento das valiosas informações que eles encerram.

Agradecimentos

O autor JSM agradece a colaboração de Celso Dal Ré Carneiro pela tradução para Português, bem como as sugestões e contribuições. Agradece a Andrea Bartorelli e Julio Landmann pelas fotografias fornecidas e a Agostina Padovan pela leitura do manuscrito preliminar. Agradece ainda aos árbitros da revista, por suas correções e contribuições para a melhoria do trabalho.

Referências

- Avilés, E. & Aballay E. (2004). Patrones fractales en una celda de Hele-Shaw. *Física Recreativa*. Informe Especial. URL: https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_especial/Patrones_fractales_Hele_Shaw.pdf. Acesso 14.05.2020
- Buc'hoz, P.J. (1775). *Première [-seconde] centurie de planches enluminées et non enluminées représentant au naturel ce qui se trouve de plus interessant et de plus curieux parmi les animaux, les vegetaux et les mineraux, pour servir d'intelligence à l'Histoire generale des trois regnes de la nature.*

entre líquidos imiscíveis.

<https://www.youtube.com/watch?v=h3O1LGe-dBw> y <https://imgur.com/gallery/gMJeV> muestran el crecimiento de cuerpos dendríticos tridimensionales por simulación numérica del proceso de difusión limitada de manera muy atractiva.

https://gmr.es/Publications/2020/COKE20/Canabal_EG2020_final.pdf. En este artículo se explica como se desarrolla un programa para simular el crecimiento de dendritas con fines puramente estéticos. Tiene un vínculo a un video explicativo.

A modo de Epílogo

Este trabajo dirigido, como se ha dicho, principalmente a docentes de cursos pre-universitarios, se ha propuesto no solo aclarar el origen mineral y no vegetal de las dendritas, sino presentar también, en un formato vinculado a la divulgación, la información que el autor ha podido recabar respecto a la génesis de las mismas. Es importante destacar que si bien existen numerosísimos trabajos dedicados al tema en el área de la metalurgia y muchos también en el área de la producción petrolera, son muy pocos los que profundizan en las condiciones geológicas en las cuales se han originado las dendritas, que parecen haber sido menospreciadas tanto por su abundancia como por desconocerse la valiosa información que encierran.

Agradecimientos

El autor agradece la colaboración de Celso Dal Ré Carneiro por sus sugerencias y aportaciones. A Andrea Bartorelli y Julio Landmann por las fotografías suministradas. A Agostina Padovan por la lectura del manuscrito preliminar y a los árbitros de la revista por sus correcciones y aportes a la mejora del trabajo.

Referências

- Avilés, E. & Aballay E. (2004). Patrones fractales en una celda de Hele-Shaw. *Física Recreativa*. Informe Especial. URL: https://www.fisicarecreativa.com/informes/infor_especial/Patrones_fractales_Hele_Shaw.pdf. Acceso 14.05.2020
- Buc'hoz, P.J. (1775). *Première [-seconde] centurie de planches enluminées et non enluminées représentant au naturel ce qui se trouve de plus interessant et de plus curieux parmi les animaux, les vegetaux et les mineraux, pour servir d'intelligence à l'Histoire generale des trois regnes*

- Paris. 220p. URL: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10665984/>. Acceso 14.05.2020
- Chopard, B., Herrmann, H., & Vicsek, T. (1991). Structure and growth mechanism of mineral dendrites. *Nature*, 353: 409-412.
- Corsi, F. (1825). *Catalogo ragionato d'una collezione di pietre di decorazione*. Roma. 235p. URL: <https://archive.org/details/CatalogoRagionatoDunaCollezione/>. Acceso 14.05.2020
- Dezallier D'Argenville, A. J. (1755). "*L'histoire naturelle éclaircie dans une de ses parties principales, l'oryctologie...*". Paris. 560p. URL: <https://ia801702.us.archive.org/20/items/lhistoirenaturel00dzal/lhistoirenaturel00dzal.pdf>. Acceso 14.05.2020
- García-Ruiz, J. M., Otálora, F., Sánchez-Navas, A. & Higes-Rolando, F. (1994). The Formation of Manganese Dendrites as the Mineral Record of Flow Structures. In: Kruhl J.H. (eds.) (1994). *Fractals and Dynamic Systems in Geoscience*. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 308-318.
- Halsey, T. C. (2000). Diffusion-Limited Aggregation: A Model for Pattern Formation. *Physics Today*, nov., 36-41. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/343196>. Acceso 14.05.2020
- Knorr, G. W. (1755). *Sammlung von Merckwürdigkeiten der Natur und Alterthümern des Erdbodens, welche petrificirte Körper enthält*. Nuremberg. 160p URL: <https://digitale.bibliothek.uni-halle.de/vd18/content/titleinfo/15149460>. Acceso 14.05.2020
- Lewis, H. C. (1880). On Dendrites. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 32, 278-279. URL: <https://www.jstor.org/stable/4060649>. Acceso 14.05.2020
- Macpherson, H.G. (1989). *Agates*. London: British Museum of Natural History. 72p.
- Mayayo-Burillo, M. J., & Yuste-Oliete, A. (2018). Experiencias de cristalización en el aula. Conceptos teóricos básicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26 (5): 352-360
- Reyero-Cortiña, C., Martín-Sánchez, M., Morcillo-Ortega, J. G., García-García, E. & Martín-Sánchez, M. T. (2008). Obtención de cristales en niveles no universitarios. *Anales Química*, 104(3), 215-219. URL: https://www.researchgate.net/publication/40836178_Obtencion_de_cristales_en_niveles_no_universitarios/link/0decc522deeb62bf8c000000/download. Acceso 14.05.2020
- Schoedler, F., & Medlocks, H. (1851). *Elements of Mineralogy*. London, J. Griffin & Co. 100p. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=miua.2002072.0001.001&view=1up&seq=8>. Acceso 14.05.2020
- Sequeiros, L. (2002). Las raíces de la Geología. Nicolas Steno, los estratos y el diluvio universal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3): 217-242. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88848/133009>. Acceso 14.05.2020
- Simonin, L.L. (1869). *Underground life, or, mines and miners*. London. 322p. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/>
- de la nature*. Paris. 220p. URL: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k10665984/>. Acceso 14.05.2020
- Chopard, B., Herrmann, H., & Vicsek, T. (1991). Structure and growth mechanism of mineral dendrites. *Nature*, 353: 409-412.
- Corsi, F. (1825). *Catalogo ragionato d'una collezione di pietre di decorazione*. Roma. 235p. URL: <https://archive.org/details/CatalogoRagionatoDunaCollezione/>. Acceso 14.05.2020
- Dezallier D'Argenville, A. J. (1755). "*L'histoire naturelle éclaircie dans une de ses parties principales, l'oryctologie...*". Paris. 560p. URL: <https://ia801702.us.archive.org/20/items/lhistoirenaturel00dzal/lhistoirenaturel00dzal.pdf>. Acceso 14.05.2020
- García-Ruiz, J. M., Otálora, F., Sánchez-Navas, A. & Higes-Rolando, F. (1994). The Formation of Manganese Dendrites as the Mineral Record of Flow Structures. In: Kruhl J.H. (eds.) (1994). *Fractals and Dynamic Systems in Geoscience*. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 308-318.
- Halsey, T. C. (2000). Diffusion-Limited Aggregation: A Model for Pattern Formation. *Physics Today*, Nov.: 36-41. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/343196>. Acceso 14.05.2020
- Knorr, G. W. (1755). *Sammlung von Merckwürdigkeiten der Natur und Alterthümern des Erdbodens, welche petrificirte Körper enthält*. Nuremberg. 160p URL: <https://digitale.bibliothek.uni-halle.de/vd18/content/titleinfo/15149460>. Acceso 14.05.2020
- Lewis, H. C. (1880). On Dendrites. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 32, 278-279. URL: <https://www.jstor.org/stable/4060649>. Acceso 14.05.2020
- Macpherson, H.G. (1989). *Agates*. British Museum of Natural History. London. 72p
- Mayayo-Burillo, M. J., & Yuste-Oliete, A. (2018). Experiencias de cristalización en el aula. Conceptos teóricos básicos. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 26 (5): 352-360
- Reyero-Cortiña, C., Martín-Sánchez, M., Morcillo-Ortega, J. G., García-García, E. & Martín-Sánchez, M. T. (2008). Obtención de cristales en niveles no universitarios. *Anales Química*, 104(3), 215-219. URL: https://www.researchgate.net/publication/40836178_Obtencion_de_cristales_en_niveles_no_universitarios/link/0decc522deeb62bf8c000000/download. Acceso 14.05.2020
- Schoedler, F., & Medlocks, H. (1851). *Elements of Mineralogy*. London, J. Griffin & Co. 100p. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=miua.2002072.0001.001&view=1up&seq=8>. Acceso 14.05.2020
- Sequeiros, L. (2002). Las raíces de la Geología. Nicolas Steno, los estratos y el diluvio universal. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3): 217-242. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88848/133009>. Acceso 14.05.2020
- Simonin, L.L. (1869). *Underground life, or, Mines and miners*. London. 322p. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/>

- pt?id=uc1.b4524510&view=1up&seq=441. Acceso 14.05.2020
- Steno, N. (1669). (2003). De Solido intra Solidum naturaliter contento Dissertationis Prodromus. Trad. L. Sequeiros. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3), 245-282. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88849/192751>. Acceso 14.05.2020
- Swartzlow, C.R. (1934). Two Dimensional Dendrites and their Origin. *American Mineralogist*, 19(9), 403-411.
- Talanquer, V. (1996). Fractales, de laberintos y espejos. Instituto Salesiano de Estudios Superiores. 99p. URL: https://nanopdf.com/download/fractales-de-laberintos-y-espejos_pdf. Acceso 14.05.2020
- Thomas, P. (2010). *Les relations dendrites / fossiles dans les calcaires lithographiques kimméridgiens de Cerin (Ain)*. Planet Terre. URL: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img309-2010-03-29.xml>. Acceso 14.05.2020
- Wirsing, A. L. (1775). *Marmora et adfines aliquos lapides*. Nuremberg. 65p. URL: <https://archive.org/details/MarmoraEtAdfinesAliquosLapidesColoribusSvis-ExprimiCuravitEtEdidit/>. Acceso 14.05.2020
- trust.org/cgi/pt?id=uc1.b4524510&view=1up&seq=441. Acceso 14.05.2020
- Steno, N. (1669). (2003). De Solido intra Solidum naturaliter contento Dissertationis Prodromus. Trad. L. Sequeiros. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 10(3), 245-282. URL: <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/88849/192751>. Acceso 14.05.2020
- Swartzlow, C.R. (1934). Two Dimensional Dendrites and Their Origin. *American Mineralogist*, 19(9), 403-411.
- Talanquer, V. (1996). *Fractales, de laberintos y espejos*. Instituto Salesiano de Estudios Superiores. 99p. URL: https://nanopdf.com/download/fractales-de-laberintos-y-espejos_pdf. Acceso 14.05.2020
- Thomas, P. (2010). *Les relations dendrites / fossiles dans les calcaires lithographiques kimméridgiens de Cerin (Ain)*. Planet Terre. URL: <https://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/Img309-2010-03-29.xml>. Acceso 14.05.2020
- Wirsing, A. L. (1775). *Marmora et adfines aliquos lapides*. Nuremberg. 65p. URL: <https://archive.org/details/MarmoraEtAdfinesAliquosLapidesColoribusSvis-ExprimiCuravitEtEdidit/>. Acceso 14.05.2020.