



História e desenvolvimento da ciência meteorítica

HISTORY AND DEVELOPMENT OF METEORITIC SCIENCE

AUGUSTO GONÇALVES NOBRE¹, GASTON EDUARDO ENRICH ROJAS², ANANDA LOPES PROENÇA RIBEIRO FONSECA³, ODILA FLORÊNCIO⁴

1 - PESQUISADOR DE PÓS-DOUTORADO NO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, SP, BRASIL.

2 - PROFESSOR DOUTOR DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS, UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, SP, BRASIL.

3 - GRADUANDA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS PELA UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE, SÃO PAULO, SP, BRASIL.

4 - PESQUISADORA SÊNIOR DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, SÃO CARLOS, SP, BRASIL.

EMAIL: AUGUSTO.GONCALVES@USP.BR, GASTONENRICH@USP.BR, A_DAFONSECA@HOTMAIL.COM, ODILA@DF.UFSCAR.BR.

Abstract: This bibliographical review work describes the origin, the historical developments, and the general panorama of Meteoritic. Mankind has had contact with meteorites since Prehistory when knowledge was associated with cultural traditions. From the systematic observation of falls, and the samples collection, studies were initiated that made it possible to verify their spatial origin. With the advance and refinement of characterization techniques, it became possible to progressively explore the composition and structure of meteorites, allowing the inference of their cosmic formation processes. Meteoritics in Brazil started in the 18th century. The country has more than 70 recorded meteorites, with some prominent examples, such as the Angra dos Reis's meteorite. A synthesis of some national authors works is presented, as a contribution to the dissemination of geoscientific knowledge.

Resumo: Este trabalho de revisão bibliográfica descreve a origem, os desdobramentos históricos e o panorama geral da Meteorítica. A humanidade possui contato com meteoritos desde a Pré-História, quando o conhecimento era associado a tradições culturais. A partir da observação sistemática de quedas, e da coleta de amostras, foram iniciados os estudos que possibilitaram constatar sua origem espacial. Com o avanço e o refinamento das técnicas de caracterização tornou-se possível explorar progressivamente a composição e estrutura dos meteoritos, permitindo inferir os processos de formação cósmica. A Meteorítica no Brasil se iniciou no século XVIII. O país possui mais de 70 meteoritos registrados, com alguns exemplares proeminentes, como o meteorito Angra dos Reis. Apresenta-se uma síntese da obra de alguns autores nacionais, como contribuição para difundir o conhecimento geocientífico.

Citation/Citação: Nobre, A. G., Rojas, G. E. E., Fonseca, A. L. P. R., & Florêncio, O. (2021). História e desenvolvimento da ciência meteorítica. *Terraê Didática*, 17(Publ. Contínua), 1-12, e021041. doi: 10.20396/td.v17i00.8667026.

Keywords: Meteorite. Science history. Scientific development.

Palavras-chave: Meteorito. História da ciência. Desenvolvimento científico.

Manuscript/Manuscrito:

Received/Recebido: 18/09/2021

Revised/Corrigido: 14/10/2021

Accepted/Aceito: 08/11/2021



Introdução

Meteoritos são substâncias sólidas naturais, rochosas, metálicas, ou rochoso-metálicas que se originaram no espaço sideral e, mesmo após atingirem a superfície terrestre, ainda mantiveram parte de sua massa preservada (Hutchison, 2004, Lauretta & Killgore, 2005).

Conforme descrito por Erickson (2003), o termo meteorito não deve ser confundido com meteoróide ou meteoro. O primeiro refere-se a materiais potencialmente meteoríticos, quando ainda estão no espaço, que normalmente resultam da desagregação de corpos parentais, como asteroides, cometas, a Lua, ou Marte. O segundo refere-se ao meteoróide que adentra na atmosfera terrestre, passando a submeter-se ao atrito com o ar. Assim, o material é aquecido e queima, permitindo a formação de um rápido rastro luminoso, popularmente conhecido como “estrela cadente”.

Pela definição de Oriti & Starbird (1977) quando a queda de um meteorito é observada, este é classificado como “queda”, mas caso ele seja recolhido em campo, sem estar associado a um evento registrado, ele é denominado “achado”. Um exemplo de queda com significativa repercussão na mídia foi o meteorito Chelyabinsk, observado na Rússia em 15 de fevereiro 2013 e descrito por Popova et al. (2013). Como destaca Carvalho et al. (2011), o meteorito Bendegó, o maior meteorito brasileiro com 5.360 kg, é um exemplo de material do tipo achado, descoberto em 1784 no interior da Bahia. A história foi relatada por Derby (1896).

A *Meteoritical Society* armazena os dados de localização aproximada de todos os meteoritos regularmente catalogados, sejam eles achados ou quedas. O banco de dados é disponibilizado em duas plataformas: *The Meteoritical Bulletin* que é publicado pelo periódico científico *Meteoritics and Planetary Science* e

o *Meteoritical Bulletin Database* que é disponibilizado on-line por meio do endereço eletrônico on-line (<https://www.lpi.usra.edu/meteor/>).

Diversos sistemas de classificação de meteoritos foram propostos ao longo da história, possuindo como base os sistemas de Rose (1864) que trabalhou com a coleção do Museu de Mineralogia da Universidade de Berlim e classificou os materiais em condritos e não-condritos e de Maskelyne (1870). Este último se baseou no acervo de meteoritos do *British Museum* para classificá-los em três grandes grupos: metálicos, metálico-rochosos e rochosos, dependendo de seus constituintes minerais.

Este trabalho tem como objetivo apresentar a origem e os desdobramentos históricos da Meteorítica, por meio de pesquisa e compilação bibliográfica, além da apresentação de fotomicrografias adquiridas por diferentes técnicas de caracterização para mostrar que os equipamentos possibilitaram aumentar o detalhe na observação de microestruturas de meteoritos. É apresentada a sucessão de fatos que levou à aceitação da origem extraterrestre dos meteoritos, o desdobramento dos estudos baseados no surgimento e desenvolvimento das técnicas de caracterização mineralógica e petrológica desde o século XIX e, por fim, são introduzidos tópicos da história da Meteorítica brasileira e uma síntese da obra de alguns de seus autores notáveis.

O estudo de meteoritos vem se popularizando pela disseminação de câmeras portáteis que permitem o registro das quedas e facilitam a propagação de notícias. Neste sentido, este trabalho visa apresentar uma compilação histórica dessa ciência, como forma de auxiliar na difusão de seu conteúdo, uma vez que a Meteorítica compõe o segmento inicial de disciplinas introdutórias de Geologia, pois os meteoritos são evidências do modelo de origem do Sistema Solar e da evolução de planetas telúricos, como a Terra. Por esse motivo, o trabalho constitui como material complementar de referência, discutindo os aspectos históricos e o panorama geral da evolução dessa ciência.

Fase Pré-Científica

Na Pré-História os conhecimentos sobre meteoritos eram muito ligados às tradições culturais locais, como nos casos do registro do “ferro celeste” em hieróglifos egípcios antigos e da liga metálica de ferro caída do céu relatada em manuscritos sumérios datados de 1900 a.C. Em ambos os casos, apesar

da referência a materiais possivelmente meteoríticos, não há confirmação de terem efetivamente de meteoritos (Zucolotto et al., 2013).

Alguns materiais interpretados como meteoritos se tornaram objetos de veneração religiosa, como a Pedra Negra exposta na Kaaba em Meca, na atual Arábia Saudita, e o material rochoso descrito por Tito Lívio [59 a.C.-17 d.C.] no Império Romano e que foi transportado até a capital do império por uma importante procissão (Zucolotto et al., 2013).

Filósofos da Antiguidade, como os gregos Anaxágoras [500 a.C.-428 a.C.], Diógenes [412 a.C.-323 a.C.] e Aristóteles [384 a.C.-322 a.C.], citam um grande meteorito que caiu próximo à Egospótamos (Grécia) em 467 a.C. Em oposição à conduta religiosa de outros povos, estes filósofos propuseram que a origem dos meteoritos e suas quedas não incluíam somente a ira divina, como era considerado até então, mas poderiam ser provenientes de corpos celestes, ilusões de óptica, fragmentos de montanhas ejetados por vulcões e materiais terrestres gerados pela interação com relâmpagos (Heide & Wlotzka, 1995, De Wever & Jacquet, 2016).

Primeiras observações de quedas

Segundo Smith et al. (2009), a queda de meteorito observada pela humanidade com registro mais antigo data de 19 de maio de 861 (no calendário juliano, ou 7 de abril do terceiro ano de Jogan, na cultural local). A amostra caiu no jardim do Templo de Nogata (*Suga Jinja Shinto*), situado no atual Japão, sendo preservada pelos sacerdotes locais. A história do evento foi retransmitida oralmente, mas não houve registro oficial. Em 1922, porém, o líder dos sacerdotes do templo convidou um geólogo local para avaliar o material e, segundo a observação feita pelo profissional, confirmou-se que se tratava de um meteorito. A amostra original somente foi caracterizada como um meteorito condrito posteriormente, por Shima et al. (1980).

A queda do meteorito de Ensisheim em 7 de novembro de 1492, na Alsácia (atualmente no território da França), remete ao primeiro evento de queda de meteorito com relato preservado por meio de gravura encontrada na obra *Crônicas de Nuremberg* de Hartmann Schedel [1440-1514]. Pela singularidade do evento, a peça encontrada – com massa de 127 kg – foi conservada na igreja local por ordem do Imperador Maximiliano I do

Sacro Império Romano-Germânico. Atualmente, a amostra pode ser visitada no *Musée de la Régence* em Ensisheim (Rowland, 1990, Marvin, 1992).

O final do século XVII foi marcado pelo trabalho de William Whiston [1667-1752] responsável pelas primeiras interpretações de que corpos celestes podem ter papel relevante na história da Terra. Segundo Marvin (1990), Whiston discute em sua obra *New Theory of the Earth*, de 1696, que a Terra originalmente poderia ter sido um cometa que entrou em órbita em relação ao Sol. Em um contexto catastrofista, Whiston ainda propôs que o grande Dilúvio bíblico teria se originado na colisão da Terra com um novo cometa, em que os vapores condensados da cauda do cometa seriam responsáveis por chuvas torrenciais.

Segundo Branco (2021), o Catastrofismo é a corrente filosófica que explica a evolução da Terra pela ocorrência de eventos únicos. Nesse contexto, o naturalista Georges Cuvier [1769-1832] descreveu que a história da Terra, assim como a da vida que nela habita, ocorria pela sobreposição de grandes catástrofes ou eventos irreversíveis, como extinções em massa. O Catastrofismo foi uma corrente antagônica ao Uniformitarismo, teoria proposta pelo naturalista escocês Sir James Hutton [1726-1797] em que a história do planeta poderia ser reconstruída pelo entendimento do encadeamento constante e sucessivo de fenômenos de soerguimento, erosão, deposição e consolidação de materiais geológicos (Branco, 2021).

Entre a queda do meteorito de Ensisheim em 1492 e meados do século XVIII, diversas quedas foram observadas (como Hraschina em 1751 e Albareto em 1766) e materiais meteoríticos recuperados. Entretanto, conforme mencionado por Smith et al. (2009), essas observações e materiais foram considerados pouco relevantes para a evolução do conhecimento científico, pois foram majoritariamente relatados sem metodologia científica, por uma população sem educação formal, fortemente religiosa e considerada pouco confiável pelos pesquisadores da época. Apenas com a revolução científica do século XVII e o início da ciência moderna o cenário começa e se modificar, a partir de obras como a de Galileu Galilei [1564-1642], em que o método científico foi claramente estabelecido e aplicado (Gribbin, 2005).

Início da Meteorítica Científica

O início da Meteorítica, como ciência, é considerado no ano de 1768, com a queda do

meteorito de Lucé, na França. O padre Charles Bacheley [1716-1795] reuniu diversos relatos de testemunhas oculares da queda e apresentou no ano seguinte uma amostra e um relatório bastante detalhado à Academia Francesa de Ciências em Paris, sistematizando as circunstâncias em que se deu o evento (Brignon, 2016). A Academia nomeou uma comissão, que incluía o renomado químico Antoine-Laurent Lavoisier [1743-1794] para examinar o material. A comissão acabou refutando a ideia de que o material teria caído do céu por sua composição química (minerais máficos, ferro e sulfeto de ferro) ser semelhante à de rochas ricas em pirita, mineral conhecido na época e comum em rochas terrestres. Apesar das conclusões da comissão, o meteorito de Lucé é reconhecido como o primeiro meteorito analisado quimicamente (Brignon, 2016). A comissão responsável pelo estudo do meteorito de Lucé o considerou como um exemplo de “rocha-trovão”, em que a crosta de fusão presente na superfície do material teria se formado pelo impacto de um raio, como no modelo grego (Smith et al., 2009).

Entre 1779 e 1803, um número considerável de quedas foi relatado (como os exemplos ocorridos em Pattiswood no ano de 1779, Évora Monte em 1796 e Benares em 1798), gerando a publicação de diversos livros, artigos e panfletos discutindo suas origens, mas cientificamente pouco sistematizados. Paralelamente, nesse período, os cientistas relutavam em considerar relatos públicos que não fossem realizados por pessoas provenientes de altas classes sociais ou fenômenos para os quais não havia teoria científica considerada razoável para explicá-los (Smith et al., 2009).

Em 1794, o físico alemão Ernst Chladni [1756-1827] publicou o livro *On the Origin of the Pallas Iron and Others Similar to it, and on Some Associated Natural Phenomena*. Na obra, Chladni descreveu meteoritos metálicos, propondo origem associada ao fenômeno de queda, concluindo que eles poderiam possuir origem extraterrestre (Marvin, 2007). O ano de 1794 foi marcante para a história da meteorítica, pois também contempla a queda do meteorito de Siena, na Itália. O evento teve repercussão na comunidade que vivia ou visitava a região, por ser considerada um ponto turístico da alta sociedade inglesa no final do século XVIII (Marvin, 1995).

No ano imediatamente seguinte, em 1795, houve uma grande queda amplamente testemunhada nas fazendas de Wold Cottage, em Yorkshi-

re, na Inglaterra. O proprietário das terras onde a queda foi observada, o jornalista Edward Topham [1751-1820], registrou o depoimento de testemunhas oculares do evento, além de outras pessoas que haviam ouvido a explosão, ou visto o brilho de seu bólido indiretamente (Pillinger & Pillinger, 1996). Outro aspecto que reforça a importância desse evento para a história da meteorítica foi o relato de John Shipley, um jovem lavrador que testemunhou a queda de um fragmento do meteorito muito próximo de onde ele se encontrava, facilitando a aquisição de amostras do material (Smith et al., 2009). No início de 1796, Edward Topham publicou no jornal local um relato detalhado das informações que havia arrecadado. Posteriormente à publicação, ele levou a rocha para Londres, onde foi colocada em exposição. Um dos visitantes da exposição foi o naturalista britânico e presidente da *Royal Society*, Sir Joseph Banks [1743-1820], que teve acesso à alíquota do material. Banks considerou que os meteoritos mereciam ser alvo de investigação científica detalhada e, juntamente com amostras de outros materiais que ele possuía, incluiu a amostra do meteorito Wold Cottage e as encaminhou ao químico Edward Howard [1774-1816] (Smith et al., 2009).

Howard descobriu que todas as amostras de meteoritos metálicos continham níquel em solução sólida com ferro, característica nunca observada em qualquer material terrestre, considerando plausível a possibilidade levantada por Chladni sobre a origem extraterrestre dos meteoritos (Sears, 1976). Além da dissolução de níquel em ferro, Howard (1802) identificou um sulfeto de ferro de estrutura hexagonal exclusivo de meteoritos e que havia sido descrito inicialmente em Albareto (atual território italiano) no ano de 1766 pelo padre Domenico Troili [1722-1792] e que posteriormente seria chamada de troilita por Gustav Rose [1798-1873] em 1862. A pirita (mineral popularmente conhecido como o “ouro dos tolos”) se diferencia da troilita pela estrutura isométrica. Como o meteorito de Lucé foi analisado quimicamente, mas não estruturalmente, não se percebeu que se tratava de uma nova fase mineral. Devido ao receio de que suas interpretações a respeito dos minerais de meteoritos fossem rejeitadas pela comunidade científica, Howard adotou termos conservadores no manuscrito para amenizar a possibilidade de origem extraterrestre do material (Sears, 1976).

As dúvidas remanescentes da comunidade científica europeia a respeito do fenômeno da queda

de meteoros foram solucionadas com a chuva de meteoros de L'Aigle na Normandia francesa em 26 de abril de 1803, quando aproximadamente 3.000 fragmentos foram recuperados (Hughes, 1982).

Marvin (1990) destaca que o Uniformitarismo foi o principal fator responsável por atrasar a aceitação dos impactos de meteoritos como um processo importante na Terra, pois a sucessão de fenômenos geológicos terrestres dispensaria a necessidade de fenômenos cósmicos para explicar a evolução da Terra.

Segundo Smith et al. (2009), após sanadas as dúvidas do fenômeno das quedas, a comunidade científica passou a investigar possíveis processos para a gênese dos meteoritos, sendo propostas teorias que abrangiam desde erupções vulcânicas na Lua até a gênese nas porções superiores da atmosfera terrestre, uma vez que no início do século XIX, ainda remanesciam suspeitas na comunidade acadêmica de que a Terra e a Lua poderiam constituir um sistema químico fechado (que não permitiria a troca de massa e que apenas energia poderia ser absorvida ou emitida ao ambiente externo). Dessa forma, todos os fenômenos atmosféricos, climáticos e, conseqüentemente, meteoríticos fariam parte desse sistema (Smith et al., 2009).

Simultaneamente, com o avanço da tecnologia dos telescópios, os astrônomos puderam observar a Lua com cada vez mais detalhe e passaram a indicar como bastante remota a possibilidade de que erupções vulcânicas na Lua fossem responsáveis pela geração de meteoritos. Outro aspecto investigado na época foi a velocidade de chegada dos meteoritos à Terra, pois, mesmo considerando as perdas no atrito atmosférico, a velocidade ainda era muito elevada para que os materiais tivessem origem lunar e fossem atraídos gravitacionalmente (Smith et al., 2009).

A partir da descoberta dos asteroides por Giuseppe Piazzi [1746-1826] em 1801, número progressivamente maior desses corpos espaciais passou a ser observado em regiões afastadas do sistema Terra-Lua, contribuindo para a noção atual de que os asteroides são corpos parentais fragmentados de origens diversas. Adicionalmente, conforme mencionado por Alexander von Humboldt [1769-1859] em 1849, não havia um motivo razoável para justificar que esses materiais ocasionalmente não colidissem com a Terra (Cunningham & Orcheston, 2011).

Ao longo do início do século XIX novas quedas foram observadas e os materiais que vinham sendo

estudados revelaram que nem todos os meteoritos possuíam a mesma composição química, textura e mineralogia, o que sugeriu que esses materiais não se formavam sempre no mesmo local. Nesta época as primeiras coleções científicas com meteoritos foram constituídas, como as dos museus de história natural de Viena, Paris e Londres.

Apesar da aceitação da origem extraterrestre dos meteoritos, ocorrida no início do século XIX, Marvin (1990) destaca que foi somente em 1891 que Grove Karl Gilbert [1843-1918], geólogo-chefe do *United States Geological Survey* levantou a possibilidade da *Meteor Crater*, localizada no estado do Arizona (Estados Unidos da América) se tratar de uma feição geomorfológica resultado do impacto de um meteorito com a crosta terrestre. Embora a origem da cratera tenha ficado desconhecida até mesmo após a morte de Gilbert, antes dessa polêmica, a Geologia desconsiderava a origem de feições similares como derivada da queda de corpos celestes, pois ao longo do século XIX as quedas de meteoritos observadas eram de pequeno porte, gerando somente pequenas cavidades no solo.

Evolução do conhecimento

Com a aceitação da origem cósmica dos meteoritos bem estabelecida, a partir de meados do século XIX, a comunidade científica passou a discutir a região de proveniência específica que os materiais poderiam possuir, bem como suas condições de formação. A partir de então, as inovações tecnológicas tiveram um papel fundamental na construção do conhecimento atual em meteorítica, ampliando imensamente o seu arcabouço de dados e evidências. Três grupos de inovações merecem destaque por suas contribuições mais notáveis: (i) a microscopia óptica; (ii) a microscopia eletrônica e microanálises; e (iii) a geoquímica isotópica e datação radiométrica.

O geólogo Henry Sorby [1826-1908] introduziu o microscópio óptico de luz polarizada na metalografia e na petrografia em 1858, permitindo um importante avanço nas técnicas analíticas de caracterização de ligas metálicas, cerâmicas, rochas e, conseqüentemente, meteoritos. Esses microscópios de luz polarizada permitem uma descrição precisa da mineralogia e da textura dos materiais, pois são capazes de determinar uma série de propriedades ópticas de materiais cristalinos nas diferentes direções do espaço.

Após alguns anos, Sorby (1864, 1877) publicou suas observações sobre meteoritos ao microscópio. Nesses trabalhos defende que meteoritos correspondem a materiais cósmicos residuais que não se agregaram para formar planetas. Os meteoritos rochosos seriam formados por processos ígneos, pois possuem algumas texturas análogas às das rochas vulcânicas. Também identificou processos posteriores de violenta fragmentação e metamorfismo. Um ponto que este autor destaca são os glóbulos perfeitamente esféricos de vidro observados em vários meteoritos rochosos (côndrulos vítreos) que apontam para condições físicas muito especiais de formação, envolvendo altas temperaturas e gotículas de magma que se mantiveram separadas, como “gotas de uma chuva de fogo”. Ele apresentou duas possíveis explicações: teriam essas esferas se formado próximo ao Sol ou as condições similares à da superfície do Sol se estenderiam para muito além do centro do Sistema Solar em épocas passadas. Vale ressaltar que nessa época não se conhecia a fusão nuclear e, portanto, não se entendia a fonte de calor do Sol. Sorby (1864, 1877) ainda propôs que os meteoritos metálicos teriam se formado a partir de uma fusão total, em que forças gravitacionais moderadas agiriam para separar o ferro fundido da parte rochosa, similar aos fornos metalúrgicos. Por outro lado, sugeriu que as texturas de Widmannstätten se formariam após a cristalização, resultando na separação de seus constituintes de forma lenta e gradual em um ambiente aquecido.

É importante mencionar que as contribuições de Sorby para a mineralogia renderam-lhe a homenagem com o nome de um mineral, a sorbyita, que pertence ao grupo dos sulfetos ($\text{CuPb}_9(\text{Sb,As})_{11}\text{S}_{26}$).

Também foi nesse período do século XIX que a proposta de Rose (1864) para a classificação de meteoritos foi apresentada, dividindo-os em três grupos metálicos e sete grupos rochosos. Gustav Rose [1798-1873] também introduziu vários termos usados atualmente na ciência meteorítica, como “côndrulo” e “condrito” termos que derivam do grego antigo *chondros*, que significa grãos, usados para descrever as estruturas esféricas presentes na maioria dos meteoritos rochosos.

No final do século XIX, Tschermak (1885) publicou uma ampla monografia sobre a microscopia de meteoritos, ilustrada com 100 fotografias de lâminas delgadas de meteoritos vistos ao microscópio (Fig. 1). Durante muitas décadas o trabalho de Tschermak (1885) foi considerado a principal referência sobre o tema. Nele são descritos como

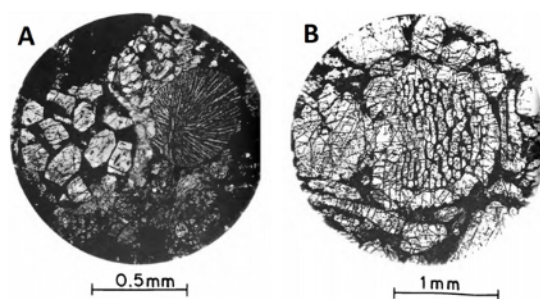


Figura 1. Fotomicrografias de meteoritos condrícticos obtidas no século XIX. A: meteorito Homestead; B: meteorito Dhurmsala. Fonte: Tschermak (1885)

constituintes principais dos meteoritos 14 fases minerais, maskelynita (material vítreo com composição de plagioclásio) e vidro magnesiano, além de carbono e hidrocarbonetos solúveis em álcool. Dentre os minerais reconhecidos, cinco não são observados em materiais terrestres: schreibersita, osbornita, oldhamita, daubrelita e lawrencita. A lawrencita merece destaque, pois consiste em fase mineral que ocorre quando meteoritos com fases metálicas são contaminadas com cloro em ambiente terrestre e, pela ação da atmosfera, permitem a cristalização da lawrencita que destrói rapidamente a estrutura metálica. Esse fenômeno ficou conhecido como “doença da lawrencita” (Norton, 1994).

Em meados do século XX, houve o desenvolvimento do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e da microsonda eletrônica. O desenvolvimento do MEV foi apresentado por Von Ardenne (1938) e suas primeiras versões comerciais surgiram nos anos 1950. Seu princípio operacional, segundo Goldstein et al. (2018), envolve a geração de um feixe de elétrons de diâmetro reduzido ($< 1\mu\text{m}$) que se movimenta seguindo uma grade de coordena-

nadas x-y de espaçamento definido. Em cada ponto, elétrons secundários ou retroespalhados são emitidos a partir da interação do feixe de elétrons com a amostra e depois são detectados e transformados nos pixels de uma imagem. Esta técnica é capaz de gerar imagens com magnificações de até 30.000 vezes, significativamente maior que a do microscópio óptico. Ela permite um detalhamento muito superior da identificação da mineralogia presente e de suas texturas, como no exemplo da imagem no meteorito de origem lunar da Figura 2.

A microsonda eletrônica foi desenvolvida a partir do MEV por Castaing (1951). De acordo com Gomes (2015), o desenvolvimento da microsonda eletrônica causou o maior impacto na caracterização de minerais desde o advento do microscópio petrográfico. Sua instrumentação é similar ao MEV, entretanto, o feixe de elétrons é focalizado em um ponto e os raios-X característicos de cada elemento químico emitidos pela interação do feixe de elétrons com a amostra são quantificados a partir de um sistema de dispersão de comprimento de onda (*Wavelength-Dispersive Spectroscopy*, WDS). Esta técnica é muito popular na meteorítica e ganhou particular notoriedade por ter sido amplamente utilizada na determinação da composição química das amostras lunares coletadas pelo programa Apollo da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), em que é necessária a capacidade de analisar, de forma não destrutiva, amostras de pequenos volumes. A vantagem da microsonda é a possibilidade de análises quantitativas, ao passo que ao MEV elas serão somente semiquantitativas. Esses dados também podem ser adquiridos sequencialmente para compor uma imagem, como no exemplo dos cóndrulos da Figura 3.

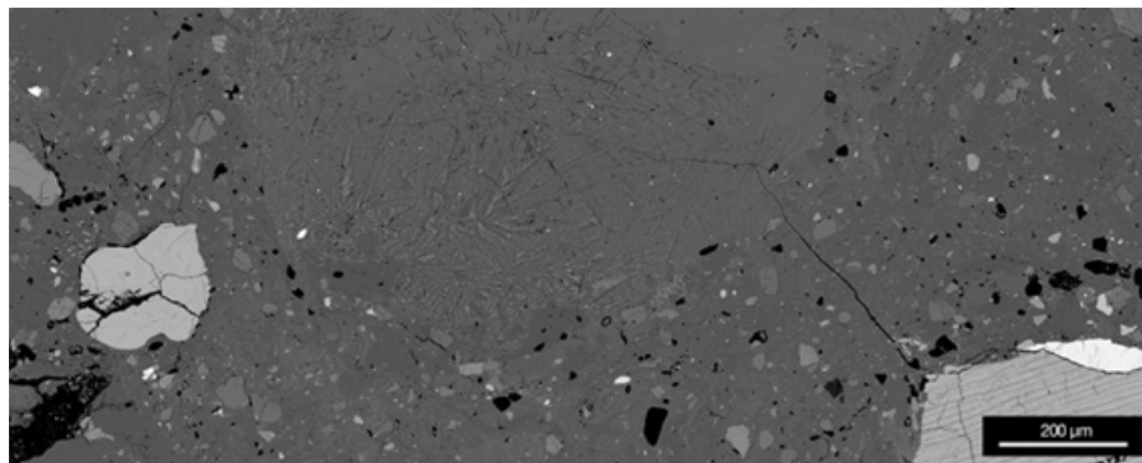


Figura 2. Imagens de elétrons retroespalhados (*backscattered electron image*) do meteorito lunar NWA11273 obtidas no Núcleo de Apoio à Pesquisa Geoanalítica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc-USP). Fonte: acervo dos autores

© <i>Terrae Didat.</i>	Campinas, SP	v.17	1-12	e021041	2021
------------------------	--------------	------	------	---------	------

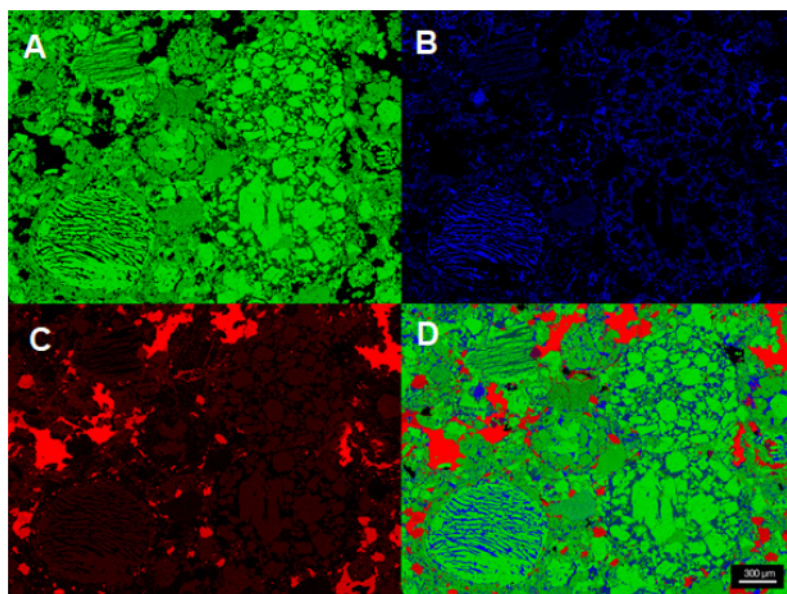


Figura 3. Imagens composicionais dos côndrulos presentes em um meteorito ainda não classificado obtidas na microsonda eletrônica JXA-FE-8530 do Núcleo de Apoio à Pesquisa Geoanalítica do IGc-USP: (A) tons de verde proporcionais ao teor de magnésio; (B) tons de azul proporcionais ao teor de alumínio; (C) tons de vermelho proporcionais ao teor de ferro; (D) composição RGB das imagens anteriores

Em um dos primeiros artigos publicados que utilizou a microsonda eletrônica, Castaing & Fredriksson (1958) analisaram pequenas esferas cósmicas de aproximadamente $60\mu\text{m}$ de diâmetro (micrometeoritos) coletadas no fundo do Oceano Pacífico, demonstrando que sua composição química era idêntica aos meteoritos metálicos. Diversos trabalhos seguintes determinaram e compilaram a composição dos principais minerais nos meteoritos (Keil & Fredriksson, 1964, Reed, 1965) e de suas fases minerais acessórias, como fosfatos e sulfetos (Goldstein & Ogilvie, 1963). Além disso, a microsonda também possibilitou a descoberta de novos minerais de tamanho extremamente diminuto, como por exemplo a sinoíta ($\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$), descrita por Andersen et al. (1964) no enstatita condrito *Jajh deh Kot Lalu*. Ainda passou a ser possível obter estimativas de temperatura de formação e/ou equilíbrio químico dos meteoritos (Van Schmus & Koffman, 1967).

A partir da difusão das técnicas de caracterização e identificação de fases minerais em meteoritos, Mason (1967) realizou a mais completa compilação sistemática dos dados referentes a esses materiais disponíveis até então, desenvolvendo a base para o sistema de classificação moderna de meteoritos. No mesmo ano, Van Schmus & Wood (1967) publicaram o atual sistema de classificação dos condritos baseado em parâmetros químicos e petrográficos.

Nas décadas seguintes, outros métodos também contribuíram para o avanço da meteorítica a partir da microanálise, como a microsonda iônica, a espectroscopia Raman, a espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente com ablação a laser (LA-ICP-MS), ou as técnicas que utilizam fonte de luz síncrotron.

As técnicas de microanálises e microscopia eletrônica ampliaram o conhecimento sobre o número de fases minerais presentes nos meteoritos. Mason (1967) compilou a presença de 38 fases minerais nos meteoritos. Rubin (1997a, 1997b) apresentou uma compilação das fases minerais e atualização da sistemática de classificação dos grupos de meteoritos, indicando

um total de 275 fases identificadas em materiais meteoríticos até aquele momento. Recentemente, Rubin & Ma (2017) apresentaram 435 fases identificadas em meteoritos, com cerca de 40 fases possuindo condição de formação exclusivamente em ambiente extraterrestre, como a kamacita ($\text{Fe-}\alpha$) e a taenita ($\text{Fe-}\gamma$).

O desenvolvimento dos espectrômetros de massa, que permitiu as análises isotópicas e a datação radiométrica nos meteoritos, foi contemporâneo ao das microanálises. Entretanto, a descoberta da radioatividade e da existência de isótopos ocorreram antes, na virada do século XIX para o XX (Attendorf & Bowen, 1997). A datação radiométrica mede a idade do processo que fracionam pares isotópicos. Os primeiros espectrômetros de massa e as primeiras tentativas de datação radiométrica ocorreram na primeira metade do século XX (Dickin, 2005). Entretanto, Attendorf e Bowen (1997) salientam que é apenas no pós-guerra que melhorias nos espectrômetros de massa possibilitaram que as técnicas isotópicas fossem aceitas e difundidas nas Geociências e na Meteorítica.

Patterson (1956) foi o primeiro a estimar a idade de formação do planeta Terra e de todo o Sistema Solar a partir da determinação isotópica $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Obteve o valor de $4,55 \pm 0,07$ bilhões de anos usando amostras de meteoritos condriticos, acondriticos e metálicos. Além disso, também

demonstrou que a composição isotópica de chumbo e urânio de galenas de diferentes localidades e de sedimentos oceânicos recentes do nosso planeta são compatíveis com o sistema isotópico dos meteoritos, o que permitiu concluir que a idade da Terra é a mesma que a dos meteoritos. De acordo com Dickin (2005), essa idade foi confirmada nas décadas seguintes por análises de outros pares isotópicos, como o $^{87}\text{Rb}/^{87}\text{Sr}$ e $^{147}\text{Sm}/^{143}\text{Nd}$, em meteoritos acondríticos.

No ano de 1969, ocorreu a queda dos meteoritos carbonáceos Allende no México, com uma massa total recuperada de mais de 100 kg, e Murchison na Austrália, com 4,5 kg. Ambos são meteoritos primitivos, pouco modificados por processos posteriores, e forneceram material em abundância e livre de contaminação terrestre para diversos estudos de química isotópica. Atualmente, estes dois meteoritos estão entre os mais estudados, dando grande contribuição para a compreensão do Sistema Solar.

Clayton et al. (1973) foram pioneiros em demonstrar a existência de heterogeneidades isotópicas primordiais no início do Sistema Solar a partir do estudo de razões isotópicas entre ^{18}O , ^{17}O e ^{16}O em meteoritos carbonáceos, entre eles o Allende e o Murchison, comparando-os com materiais terrestres e lunares. Posteriormente, estes isótopos foram amplamente usados pela comunidade acadêmica para discriminar diferentes corpos parentais de cada meteorito (Greenwood et al, 2020). Gray & Compton (1974) observaram valores anormalmente altos de ^{26}Mg em relação aos outros isótopos de Mg no meteorito Allende e os correlacionaram com a produção a partir do decaimento do isótopo radioativo de meia vida curta ^{26}Al , que estaria presente no início do Sistema Solar, mas atualmente está extinto. Estes autores também sugerem que, se a acreção planetesimal ocorreu imediatamente depois da formação do ^{26}Al , o calor derivado do decaimento radioativo seria suficiente para explicar o metamorfismo dos condritos. Lewis et al. (1987) descreveram nos meteoritos Allende e Murchison a presença de diamantes com composição isotópica muito diferente das encontradas no Sistema Solar, e os interpretaram como sendo anteriores à formação do sistema, denominando-os de “grãos pré-solares”.

As últimas classes de meteoritos com origem específica a serem definidas foram os lunares e marcianos, catalogados somente na década de 1980 (Marvin, 1983, Bogard & Johnson, 1983). Foi de fundamental importância nos trabalhos da época a comparação dos dados de química mineral e iso-

tópica desses meteoritos com aqueles dados obtidos nas amostras da Lua pelo programa Apollo da NASA e nas análises das sondas Viking em Marte, também da NASA. A avaliação crítica mais atualizada do sistema de classificação de meteoritos foi apresentada por Weisberg et al. (2006) a partir da revisão de dados geoquímicos e de razões isotópicas apresentadas por mais de 200 trabalhos.

Atualmente, a alta precisão dos espectrômetros de massa, bem como a diversidade de métodos isotópicos (por exemplo $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{26}\text{Al}/^{26}\text{Mg}$, $^{53}\text{Mn}/^{53}\text{Cr}$ e $^{182}\text{Hf}/^{182}\text{W}$) permitem determinar detalhes da sequência de eventos da formação do Sistema Solar. Connelly & Bizzarro (2017) resumizam que: (i) os primeiros sólidos a se formarem são as inclusões refratárias dos meteoritos condriticos, cuja idade mais antiga é de $4.567,30 \pm 0,16$ Ma e foi obtida pelo método Pb-Pb; (ii) o processo de formação dessas inclusões refratárias durou menos de 1Ma; (iii) a grande maioria dos côndrulos se formaram nos primeiros 5 milhões de anos, em parte contemporâneo às inclusões refratárias; (iv) a análise Pb-Pb de alguns meteoritos acondriticos mostram que o processo de formação, diferenciação e magmatismo dos planetesimais teve início pelo menos 3 milhões de anos depois da formação das inclusões refratárias. Recentemente, Heck et al. (2020) determinaram, a partir de isótopos de neônio, que a maioria dos grãos pré-solares contidos no meteorito Murchison são cerca de 300 milhões de anos mais velhos que o Sistema Solar.

A Meteorítica no Brasil

A meteorítica no Brasil sempre acompanhou a evolução do conhecimento mundial. Entretanto, o seu desenvolvimento esteve condicionado à disponibilidade de meteoritos, investimentos em ciência e tecnologia de cada época e à presença de pesquisadores comprometidos com a área. Atualmente, o Brasil conta com mais de 70 meteoritos classificados no *Meteoritical Bulletin Database*, e o trabalho de Zucolotto et al. (2013) detalha a importância de cada peça na história da meteorítica brasileira.

O primeiro meteorito encontrado no Brasil foi o Bendegó, em 1784 (Carvalho, 1888, Carvalho et al., 2011). A descoberta da massa, próxima ao riacho de Bendegó, na Bahia (atual município de Monte Santo), ocorreu dez anos antes da publicação das ideias de Chladini sobre a origem extraterrestre dos meteoritos. As primeiras publicações científicas que identificam o Bendegó como um meteorito

foram as de Mornay (1816) e Wollaston (1816), na forma de artigos em sequência da mesma edição da revista *Philosophical Transactions of the Royal Society*. O primeiro artigo relata a descoberta e as observações de campo, enquanto o segundo o analisa do ponto de vista químico e mineralógico.

Angra dos Reis, meteorito de característica ímpar que caiu em 1869 e atualmente dá nome ao grupo dos “angritos”, tornou-se o primeiro meteorito brasileiro a ser estudado detalhadamente através da técnica de microscopia petrográfica (Ludwig & Tschermak, 1887).

Na virada do século XX, o geólogo norte-americano Orville A. Derby [1851-1915] se destacou por sua contribuição à Meteorítica brasileira. Derby trabalhou na Comissão Geológica do Império (1874-1876), no Museu Nacional (1879-1886) e na Comissão Geográfica e Geológica de São Paulo (1886-1904) e, ao longo de sua carreira, publicou mais de uma centena de artigos sobre a Paleontologia, a Mineralogia e a Geologia do Brasil (Branner, 1916, Tosatto, 2001). Seus estudos incluem diversos trabalhos sobre os meteoritos Bendegó, Santa Catarina, Macau, Itapicuru-Mirim, Santa Bárbara, Minas Gerais e Angra dos Reis (Derby, 1888, 1898 e as compilações em Tosatto, 2001 e Zucolotto et al., 2013).

Ao longo do século XX, vários autores contribuíram com o desenvolvimento da Meteorítica brasileira. Entre os destaques está o Prof. Dr. Celso de Barros Gomes. Ele foi o responsável pela aquisição da primeira microsonda eletrônica no Brasil, instalada na Universidade de São Paulo em 1971 (Gomes, 2015). Além disso, liderou um grupo de pesquisa em parceria com instituições americanas sobre os meteoritos brasileiros que resultou na publicação de 17 artigos científicos entre 1976 e 1980 e do livro *Brazilian Stone Meteorites* (Gomes & Keil, 1980). A química dos minerais de praticamente todos os meteoritos rochosos brasileiros conhecidos à época foram estudados. Os meteoritos Ipiranga, Putinga e São José do Rio Preto foram os primeiros a terem publicadas suas análises químicas de minerais realizadas em uma microsonda instalada no país (Gomes et al., 1978a, 1978b, Keil et al., 1978).

Atualmente, a principal referência brasileira, como pesquisadora, em meteoritos é a Profa. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto, curadora da coleção de meteoritos do Museu Nacional, vinculado à Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), desde 1997. A astronomia possui mais de 50 artigos publi-

cados na área, com linha de pesquisa especialmente voltada à investigação e catalogação de meteoritos brasileiros (como Atencio et al., 2020 e Zucolotto et al., 2018), participando ativamente de campanhas de conscientização popular e projetos de divulgação científica (Witovisk et al., 2018). É a autora principal do livro *Decifrando os Meteoritos* (Zucolotto et al., 2013), a obra de referência brasileira mais atualizada e moderna na área da Meteorítica.

Outros grupos brasileiros que contribuíram com a difusão e aprofundamento científico da Meteorítica merecem ser destacados como o Dr. Wilton Pinto de Carvalho e a Profa. Dra. Débora Correia Rios da Universidade Federal da Bahia (UFBA), com trabalhos científicos e projetos de extensão vinculados à disseminação da Meteorítica (Carvalho et al., 2018, Araújo et al., 2018), o Centro de Rádio-Astronomia e Astrofísica Mackenzie (CRAAM) da Universidade Presbiteriana Mackenzie, idealizado pelo Prof. Pierre Kaufmann [1938-2017], um dos precursores do monitoramento por radioastronomia no país (Kaufmann et al., 1989, Valio et al., 2013) e o grupo liderado pelo Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), especializado no sensoriamento remoto de estruturas de impacto, tanto na Terra (Reimold et al., 2018, Vasconcelos et al., 2019), como em outros corpos celestes (Crósta et al., 2021, Villaça et al., 2021).

Nas últimas décadas, houve significativo crescimento da infraestrutura analítica de pesquisa no Brasil nas áreas vinculadas às Ciências dos Materiais. Como consequência, os estudos em Meteorítica feitos no Brasil incluem dados analíticos obtidos por diferentes técnicas, como por exemplo espectroscopia Mössbauer, fluorescência de raios X, micro Raman, catodoluminescência, microfluorescência de raios-X com luz síncrotron e tomografia de raios-X (Scorzelli, 2008, Carvalho et al., 2018, Tosi et al., 2018, Zucolotto et al., 2018, Atencio et al., 2020).

Considerações Finais

Este trabalho descreve a origem, o desenvolvimento do conhecimento científico e um panorama geral a respeito da Meteorítica, enfatizando a correlação direta da evolução dessa ciência com a Astronomia, a Geologia e a Metalurgia.

Na Pré-História, o conhecimento a respeito do tema era fortemente vinculado às tradições culturais, enquanto na Antiguidade a abordagem

dos filósofos gregos foi apontar fenômenos naturais que poderiam resultar na disponibilização dos materiais, como impactos por relâmpagos. Apesar de integrar diversas áreas do conhecimento, a evolução da ciência sofreu com o ceticismo e concepções uniformitaristas conservadoras, ficando temporalmente atrasada em comparação à observação de corpos celestes pela Astronomia e o estudo de rochas terrestres pela Geologia. Por esse motivo, a aceitação da origem extraterrestre dos materiais aconteceu somente na transição do século XVIII para o século XIX após o evento de L'Aigle.

A evolução da Meteorítica a partir do século XIX passou a estar ligada diretamente às inovações das técnicas de caracterização de materiais, destacando-se a contribuição da microscopia óptica, microscopia eletrônica e microanálises, além da geoquímica isotópica e da datação radiométrica, que permitiram a observação cada vez mais detalhada das microestruturas, e possibilitaram interpretações geoquímicas e geocronológicas mais precisas de sua origem, com refinamento do sistema de classificação.

A microscopia óptica permitiu observar as principais fases minerais em fração granulométrica submilimétrica, além de microestruturas como côndrulos e matrizes vítreas, enquanto a MEV permitiu observar as microestruturas com mais resolução e a realização de análises semiquantitativas nas amostras. A microsonda eletrônica é uma adaptação da instrumentação da MEV que permite também a realização de análises quantitativas pontuais e o refinamento na composição de mapas composicionais obtidos por MEV, tendo possibilitado grande avanço na identificação de novos minerais em meteoritos.

A Meteorítica no contexto brasileiro teve origem no período colonial, no século XVIII, com a descoberta do meteorito Bendegó; dentre as maiores contribuições científicas identificadas em meteoritos brasileiros está o meteorito-tipo do grupo dos angritos, o Angra dos Reis, queda de 1869. Entre os séculos XIX e XX as obras de Derby e Gomes foram expoentes na Meteorítica brasileira, mas outros grupos proeminentes foram identificados na UFBA, Universidade Mackenzie e Unicamp. Atualmente a maior sumidade brasileira é Profa. Dra. Maria Elizabeth Zucolotto do Museu Nacional da UFRJ com diversos trabalhos científicos e de extensão dedicados à descrição e disseminação de conhecimento a respeito de meteoritos brasileiros.

Os meteoritos, por não serem submetidos a processos dinâmicos como os materiais geológicos

terrestres, preservam indícios significativos da formação e evolução do Sistema Solar, sendo importantes prospectos para o entendimento científico da origem da Terra.

Com a popularização progressiva que a Meteorítica tem passado, graças à proliferação de câmeras que permitem o registro de quedas e facilitam a coleta de materiais para estudos, além do crescimento da repercussão midiática devido a campanhas de disseminação científica realizadas pelos pesquisadores da área, os cursos introdutórios de Geologia enriqueceram-se com a discussão a respeito dessa ciência. Este trabalho visa contribuir com material bibliográfico para favorecer o debate na comunidade geocientífica.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES, Código de Financiamento 001), do Programa Institucional de Voluntariado em Iniciação Científica da Universidade Presbiteriana Mackenzie (PIVIC Mackenzie) e do Programa Institucional de Iniciação Científica e Programa Institucional de Iniciação Tecnológica da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Agradecemos aos revisores e editores pelas críticas e sugestões que melhoraram o artigo.

Referências

- Andersen, C., Keil, K., & Mason, B. (1964). Silicon oxynitride: A meteoritic mineral. *Science*, 146(3641), 256-257. doi: 10.1126/science.146.3641.256.
- Araújo, A., Rios, D., Carvalho, W., & Pereira, C. (2018). An Evaluation of the Handheld X-Ray Fluorescence Technique and Applications in the Study of Iron Meteorites. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(3), 717-730. doi: 10.11137/2018_3_717_730.
- Atencio, D., Cunha, D., Moutinho, A., Zucolotto, M., Tosi, A., & Villça, C. (2020). Parauapebas meteorite from Pará, Brazil, a "hammer" breccia chondrite. *Brazilian Journal of Geology*, 50(3), 1-12. doi: 10.1590/2317-4889202020190085.
- Attendorf, H., & Bowen, R. (1997). *Radioactive and Stable Isotope Geology*. Chennai: Springer Science + Business Media Dordrecht.
- Bogard, D., & Johnson, P. (1983). Martian gases in an antarctic meteorite? *Science*, 221(4611), 651-654. doi: 10.1126/science.221.4611.651.
- Branco, H. (2021). Aspectos filosóficos da obra "Princípios de Geologia" de Charles Lyell: uma abordagem inicial. *Terræ Didactica*, 17(Publ. Continua), 1-x, e021039. doi: 10.20396/td.v17i00.8666003.
- Branner, J. (1916). Orville A. Derby. *Journal of Geology*, 24(3), 209-214.
- Brignon, A. (2016). L'abbé Bacheley et la découverte des premiers dinosaures et crocodiliens marins dans le Jurassique des Vaches Noires (Callovien/Oxfordien, Normandie). *Comptes Rendus Palevol*, 15(5), 595-605.

- doi: 10.1016/j.crpv.2015.10.004.
- Carvalho, J. (1888). *Meteorito de Bendegó. Relatório apresentado ao Ministério da Agricultura, Commercio e Obras Publicas e à Sociedade de Geographia do Rio de Janeiro sobre a remoção do meteorito de Bendegó do sertão da Província da Bahia para o Museu Nacional*. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional.
- Carvalho, W., Rios, D., Conceição, H., Zucolotto, M., & Orazio, M. (2011). O Meteorito Bendegó: história, mineralogia e classificação química. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(1), 141-156. doi: 10.25249/0375-7536.2011411141156.
- Carvalho, W., Rios, D., Zucolotto, M., Conceição, H., Araújo, A., & Tosi, A. (2018). O Meteorito Palmas de Monte Alto: aspectos petrográficos e mineralo-químicos. *Geologia USP - Série Científica*, 18(3), 15-31. doi: 10.11606/issn.2316-9095.v18-132539.
- Castaing, R. (1951). *Application des sondes électroniques a une methode d'analyse ponctuelle chimique et crystallographique*. Paris: Université de Paris (PhD thesis).
- Castaing, K., & Fredriksson, K. (1958). Analyses of cosmic spherules with an X-ray microanalyser. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 14(1), 114-116. doi: 10.1016/0016-7037(58)90099-1.
- Clayton, R., Grossman, L., & Mayeda, T. (1973). A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites. *Science*, 182(4111), 485-488. doi: 10.1126/science.182.4111.485.
- Connolly, J., & Bizzarro, M. (2017). Pb-Pb chronometry and the early Solar System. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 201(1), 345-363. doi: 10.1016/j.gca.2016.10.044.
- Crósta, A., Silber, E., Lopes, R., Johnson, B., Bjornnes, E., Malaska, M., ... Soderblom, J. Modeling the formation of Menrva impact crater on Titan: Implications for habitability. *Icarus*, 370(1), 114679. doi: 10.1016/j.icarus.2021.114679.
- Cunningham, C., & Orchiston, W. (2011). Who invented the word asteroid: William Herschel or Stephen Weston? *Journal of Astronomical History and Heritage*, 14(3), 230-234.
- De Wever, P., & Jacquet, E. (2016). *Terre de Météorites*. France: EDP Sciences. doi: 10.1051/978-2-7598-1998-0.
- Derby, O. (1888). Meteoritos Brasileiros. *Revista do Observatório Nacional*, 3(1), 1-20.
- Derby, O. (1896). Estudo sobre o Meteorito Bendegó. *Archivos do Museu Nacional*, 9(1), 89-184.
- Derby, O. (1898). Bendegó, the great Brazilian meteorite. *The Brazilian Bulletin (Mackenzie College)*, 1(1), 30-32.
- Dickin, A. (2005). *Radiogenic Isotope Geology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Erickson, J. (2003). *Asteroids, Comets, and Meteorites: Cosmic Invaders of the Earth*. New York: Infobase Publishing.
- Goldstein, J., Newsbury, D., Michael, J., Ritchie, N., Scott, J., & Joy, D. (2018). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. New York: Springer Science+Business Media LLC.
- Goldstein, J., & Ogilvie, R. (1963). Electron microanalysis of metallic meteorites: Part 1-Phosphides and sulfides. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 27(6), 623-636. doi: 10.1016/0016-7037(63)90015-2.
- Gomes, C. (2015). *A microsonda eletrônica na geologia*. São Paulo: Edusp.
- Gomes, C., & Keil, K. (1980). *Brazilian Stone Meteorites*. New Mexico: University of New Mexico Press.
- Gomes, C., Keil, K., Ruberti, E., Jarosewich, E., & Silva, J. (1978a). Studies of Brazilian Meteorites XVI: Mineralogy, petrology and chemistry of the Ipiranga, Paraná, chondrite. *Chemie der Erde*, 37(1), 265-270.
- Gomes, C., Ulbrich, M., Keil, K., Kirchner, E., & Jarosewich, E. (1978b). Studies of Brazilian meteorites XV: Mineralogy, petrology and chemistry of the São José do Rio Preto, São Paulo, chondrite. *Naturalia*, 4(1) 25-30.
- Gray, C., & Compston, W. (1974). Excess ^{26}Mg in the Allende Meteorite. *Nature*, 251(1), 495-497. doi: 10.1038/251495a0.
- Greenwood, R., Burbine, T., & Franchi, I. (2020). Linking asteroids and meteorites to the primordial planetary population. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 277(1), 377-406. doi: 10.1016/j.gca.2020.02.004.
- Gribbin, J. (2005). *História da Ciência de 1543 ao presente*. Publicações Europa-América.
- Heck, P., Greer, J., Kööp, L., Trappitsch, R., Gyngard, F., Busemann, H., ... Wieler, R. (2020). Lifetimes of interstellar dust from cosmic ray exposure ages of presolar silicon carbide. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(4), 1884-1889. doi: 10.1073/pnas.1904573117.
- Heide, F., & Wlotzka, F. (1995). *Meteorites*. New York: Springer-Verlag.
- Howard, E. (1802). VII. Experiments and observations on certain stony and metalline substances, which at different times are said to have fallen on the earth; also on various kinds of native iron. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92(1), 168-212. doi: 10.1098/rstl.1802.0009.
- Hughes, D. (1982). The history of meteors and meteor showers. *Vistas in Astronomy*, 26(4), 325-345. doi: 10.1016/0083-6656(82)90010-1.
- Hutchison, R. (2004). *Meteorites A Petrologic, Chemical and Isotopic Synthesis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaufmann, P., Kuntz, V., Paes Leme, N., Piazza, L., Vilas Boas, J., Brecher, K., & Crouchley, J. Effects of the Large June 1975 Meteoroid Storm on Earth's Ionosphere. *Science*, 246(4931), 787-790. doi: 10.1126/science.246.4931.787.
- Keil, K., & Fredriksson, K. (1964). The iron, magnesium, and calcium distribution in coexisting olivines and rhombic pyroxenes of chondrites. *Journal of Geophysical Research*, 69(16), 3487-3515. doi: 10.1029/JZ069i016p03487.
- Keil, K., Lange, D., Ulbrich, M., Gomes, C., Jarosewich, E., Roisenberg, A., & Souza, M. (1978). Studies of Brazilian meteorites XIII. Mineralogy, petrology and chemistry of the Putinga, Rio Grande do Sul, chondrite. *Meteoritics*, 13(2), 165-175. doi: 10.1111/j.1945-5100.1978.tb00806.x.
- Lauretta, S., & Killgore, M. (2005). *A Color Atlas of Meteorites in Thin Section*. Coréia do Sul: Golden Retriever Publications.
- Lewis, R., Ming, T., Wacker, J., Anders, E., & Steel, E. (1987). Interstellar diamonds in meteorites. *Nature*, 326(1), 160-162. doi: 10.1038/326160a0.
- Ludwig, E., & Tschermak, G. (1887) XII. Der Meteorit von Angra dos Reis. *Mineralogische und petrographische Mitteilungen*, 8(5), 341-355. doi: 10.1007/BF02993298.
- Marvin, U. (1983). The discovery and initial characterization of Allan Hills 81005: The first lunar meteorite. *Geophysical Research Letters*, 10(9), 775-778. doi: 10.1029/GL010i009p00775.
- Marvin, U. (1990). Impact and its revolutionary implications for geology. In: Sharpton, V.L., & Ward, P.D. (1990). *Global Catastrophes in Earth History: An Interdisciplinary Conference on Impacts, Volcanism, and Mass Mortality*. Boulder, CO: Geological Society of America, Special Paper, 247. p. 147-154.
- Marvin, U. (1992). The meteorite of Ensisheim: 1492 to 1992. *Meteoritics*, 27(1), 28-72. doi: 10.1111/j.1945-5100.1992.tb01056.x.

- Marvin, U. (1995). Siena, 1794: History's most consequential meteorite fall. *Meteoritics*, 30(5), 540-541.
- Marvin, U. (2007). Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) and the origins of modern meteorite research. *Meteoritics & Planetary Science*, 42(S9), B3-B68. doi: 10.1111/j.1945-5100.2007.tb00606.x.
- Maskelyne, M. (1870). On the mineral constituents of meteorites. *Proceedings of the Royal Society of London*, 18(114), 146-157. doi: 10.1098/rspl.1869.0035.
- Mason, B. (1967). Meteorites. *American Scientist*, 55(4), 429-455.
- Mornay, A. (1816). An Account on the Discovery of a Mass of Native Iron in Brasil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 106(1), 43-45.
- Norton, R. (1994). *Rocks from Space: meteorites and meteorite hunters*. Missoula: Mountain Press Pub.
- Orti, R., & Starbird, W. (1977). *Introduction to Astronomy*. Glencoe Press.
- Patterson, C. (1956). Age of meteorites and the earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 10(4), 230-237. doi: 10.1016/0016-7037(56)90036-9.
- Pillinger, C., & Pillinger, J. (1996). The Wold Cottage meteorite: Not just any ordinary chondrite. *Meteoritics & Planetary Science*, 31(5), 589-605. doi: 10.1111/j.1945-5100.1996.tb02032.x.
- Popova, O., Jennkens, P., Emelyanenko, V., Kartashova, A., Biryukov, E., Khaibrakhmanov, S., ... Mikhouchi, T. (2013). Chelyabinsk airburst, damage assessment, meteorite recovery, and characterization. *Science*, 342(6162), 1069-1073. doi: 10.1126/science.1242642.
- Reed, S. (1965). Electron-probe microanalysis of the metallic phases in iron meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29(5), 535-549. doi: 10.1016/0016-7037(65)90045-1.
- Reimold, W., Crósta, A., Hasch, M., Kowitz, A., Hauser, N., Sanchez, J., ... Zaag, P. (2018). Shock deformation confirms the impact origin for the Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul, Brazil, structure. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(10), 2384-2397. doi: 10.1111/maps.13233.
- Rose, G. (1864). *Beschreibung und Eintheilung der Meteoriten auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin 1863*, Berlin: Königlich Akademie der Wissenschaften.
- Rowland, I. (1990). A contemporary account of the Ensisheim meteorite, 1492. *Meteoritics*, 25(1), 19-22. doi: 10.1111/j.1945-5100.1990.tb00966.x.
- Rubin, A. (1997a). Mineralogy of meteorite groups. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(2), 231-247. doi: 10.1111/j.1945-5100.1997.tb01262.x.
- Rubin, A. (1997b). Mineralogy of meteorite groups: An update. *Meteoritics & Planetary Science*, 32(5), 733-734. doi: 10.1111/j.1945-5100.1997.tb01558.x.
- Rubin, A., & Ma, C. (2017). Meteoritic minerals and their origins. *Geochemistry*, 77(3), 325-385. doi: 10.1016/j.chemer.2017.01.005.
- Scorzelli, R. (2008). Meteorites: messengers from the outer space. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 19(2), 226-231. doi: 10.1590/S0103-50532008000200005.
- Sears, D. (1976). Edward Charles Howard and an early British contribution to meteoritics. *Journal of the British Astronomical Association*, 86(1), 133-139.
- Shima, M., Murayama, S., Yabuki, H., & Okada, A. (1980). Petrography, Mineralogy and Chemical Composition on the Chondrite Nogata, Nogata-shi, Fukuoka-ken, Japan: Oldest Observed Fall in the World. In: Criswell, P. Ed. (1980). *Forty-Third Annual Meeting of the Meteoritical Society*. Houston: Lunar and Planetary Institute.
- Smith, C., Russell, S., & Benedix, G. (2009). *Meteorites*. USA: Firefly Books.
- Sorby, H. (1858). On the microscopical, structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 14(1), 453-500. doi: 10.1144/GSL.JGS.1858.014.01-02.44.
- Sorby, H. (1864). XII. On the microscopical structure of meteorites. *Proceedings of the Royal Society of London*, 13(1), 333-334. doi: 10.1098/rspl.1863.0075.
- Sorby, H. (1877). On the Structure and Origin of Meteorites. *Nature*, 15(388), 495-498.
- Tosatto, P. (2001). *Orville A. Derby, o pai da Geologia do Brasil*. Rio de Janeiro: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- Tosi, A., Zucolotto, M., Mendes, J., Ludka, I., & Vasques, F. (2018). Color electron microprobe cathodoluminescence of Bishunpur meteorite compared with the traditional optical microscopy method. *REM - International Engineering Journal*, 71(2), p. 175-181. doi: 10.1590/0370-44672017710053.
- Tschermak, G. (1885). Die Mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten. *Smithsonian Contributions to Astrophysics*, 4(1), 137-239.
- Valio, A., Kaufmann, P., Giménez de Castro, C., Raulin, J., Fernandes, L., & Marun, A. (2013). Polarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescopes at Two Millimeter Wavelength Ranges. *Solar Physics*, 283(2), 651-665. doi: 10.1007/s11207-013-0237-4.
- Van Schmus, W., & Koffman, D. (1967). Equilibration temperatures of iron and magnesium in chondritic meteorites. *Science*, 155(3765), 1009-1011. doi: 10.1126/science.155.3765.1009.
- Van Schmus, W., & Wood, J. (1967). A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 31(5), 747-754. doi: 10.1016/S0016-7037(67)80030-9.
- Vasconcelos, M., Rocha, F., Crósta, A., Wünnemann, K., Güldemeister, N., Leite, E., Ferreira, J., Reimold, W. (2019). Insights about the formation of a complex impact structure formed in basalt from numerical modeling: The Vista Alegre structure, southern Brazil. *Meteoritics & Planetary Science*, 54(10), 2373-2383. doi: 10.1111/maps.13298.
- Villaça, C., Crósta, A., & Grohmann, C. (2021). Morphometric analysis of Pluto's impact craters. *Remote Sensing*, 13(3), 377. doi: 10.3390/rs13030377.
- Von Ardenne, M. (1938). Das Elektronen-Rastermikroskop. *Zeitschrift für Physik*, 109(1), 553-572. doi: 10.1007/BF01341584.
- Weisberg, M., McCoy, T., & Krot, A. (2006). Systematics and evaluation of meteorite classification. In: Lauretta, D., & McSween, H. Eds. (2006). *Meteorites and the Early Solar System II*. Arizona: The University of Arizona Press.
- Witovisk, L., Carvalho, L., Costa, A., Guedes, E., Zucolotto, M., Trindade, V., ... Nunes, S. (2018). Curso de Extensão "Meninas com Ciência": Potencialidades da Divulgação da Geologia e Paleontologia na Perspectiva de Gênero. *Anuário do Instituto de Geociências*, 41(2), 233-240. doi: 10.11137/2018_2_233_240.
- Wollaston, W. (1816). XVI. Observations and experiments on the mass of native iron found in Brasil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 106(1), 281-285. doi: 10.1098/rstl.1816.0017.
- Zucolotto, M., Tosi, A., Villaça, C., Moutinho, A., Andrade, D., Faulstich, F., ... Rocha, M. (2018). Serra Pelada: The first Amazonian Meteorite fall is a Eucrite (basalt) from Asteroid 4-Vesta. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90(1), 3-16. doi: 10.1590/0001-3765201820170854.
- Zucolotto, M., Fonseca, A., & Antonello, L. (2013). *Decifrando os Meteoritos*. Rio de Janeiro: Museu Nacional.