



PEDRO WAGNER GONÇALVES
CELSO DAL RÉ CARNEIRO

Magmas e rochas ígneas: o estudo do calor interno da Terra

**PEDRO WAGNER
GONÇALVES e CELSO
DAL RÉ CARNEIRO**
são professores do
Departamento de
Geociências Aplicadas
ao Ensino do Instituto de
Geociências da Unicamp.

INTRODUÇÃO

Poderia existir algo como o magma?

Em pleno século XXI, a pergunta que pode parecer inusitada tanto a geólogos, quanto para leigos, não é despropositada. A maioria dos naturalistas dedicados ao estudo das rochas, sua distribuição e suas relações, bem como sua origem, responderia secamente “Não é possível existir tal substância!”, se estivéssemos no início do século XIX.

Isso sugere quão novo é esse conceito e, ao mesmo tempo, indica tratar-se de idéia altamente abstrata capaz de dar conta do aparecimento de certas rochas que encontramos na superfície terrestre.

Durante o século XIX, as explicações de como algumas rochas foram originadas mudaram drasticamente. A idéia de que fenômenos vinculados ao calor interno da Terra eram aspectos periféricos e limitados no espaço só desapareceu do pensamento científico moderno durante o século XIX. De fato, o que surpreende o cidadão culto do século XXI denuncia problemas cruciais do nosso conhecimento sobre como a natureza se comporta, tais como os limites experimentais, a dificuldade de generalização, e a influência de aspectos culturais insuspeitos para construir explicações *positivas* sobre o comportamento do mundo físico.

Trazer esse debate da ciência moderna até nossos dias pode aclarar certos problemas metodológicos relevantes nos estudos da Terra. Tratar de rochas fundidas e seus produtos é especialmente estratégico para revelar o quão pouco conhecemos da natureza. Basta mencionar que, há pouco mais de meio século, a maioria dos petrólogos acreditava que a produção de granitos e o vulcanismo não teriam entre si qualquer ligação. Uma aventura pela história da *descoberta* do magma demonstra como elementos políticos, sociais e culturais intercambiam-se aos conceitos e explicações sobre os processos naturais.

Magma: trajetória conturbada de um conceito quase inaceitável

A origem magmática de certas rochas, principalmente os granitos, acha-se entre as controvérsias científicas mais notáveis da história da geologia e da própria ciência moderna. Poucos trabalhos esmiuçaram como essa história (quase uma verdadeira “estória”) interfere e limita nossas modernas noções apoiadas em detalhados dados isotópicos, geoquímicos e geofísicos. A indagação forte, ainda atual e provocativa de Krauskopf (1968) continua a ecoar:

“[...] quais são os limites de nossa fé em uma natureza ordenada quando explicamos fatos ocorridos em qualquer lugar do espaço ou do tempo? Com inúmeras indeterminações sobre os fenômenos físicos, com claros limites experimentais para reproduzir fenômenos naturais complexos, de dimensões espaciais gigantescas, que ocorrem em intervalos de tempo incompatíveis com nossas escalas de trabalho, quanto projetamos de nossa crença de uma natureza ordenada sobre o aparente caos da natureza?”.

Processos magmáticos são especialmente elucidativos para denunciar o quanto a geologia é interpretativa e hipotética, embora os leigos (e também muitos geólogos) acreditem tratar-se de uma ciência positiva sobre como se formaram os materiais sólidos de nosso planeta e, conseqüentemente, o ambiente favorável à existência e permanência da vida, bem como suas múltiplas formas de organização, das bactérias à civilização.

Críticos assinalam o quanto nossa ciência avançou apesar de sua juventude de pouco mais de dois séculos. Dos primeiros mapas geológicos e das formas regulares de classificação de rochas do último quartel do século XVIII, das previsões precisas que multiplicaram exponencialmente a descoberta e a produção de recursos naturais durante os séculos XIX e XX, do caminho que partiu de mapas geológicos para os mapas

temáticos altamente especializados, necessários para planejamento urbano e rural, etc., pretendemos enfatizar que todos esses sucessos resultam de conclusões práticas e razoáveis, mas carregadas de interpretações subjetivas inerentes às dificuldades teóricas que a geologia precisa enfrentar.

CONCEITO DE MAGMATISMO

O que é magma?

As rochas ígneas (do latim *ignis*, “fogo”) são formadas a partir de um líquido, de rocha fundida, denominado *magma*. O magma é um material líquido natural, composto de uma mistura dos elementos mais abundantes na Terra, O e Si, associados a quantidades menores de Al, Ca, Mg, Fe, Na e K, além de outros elementos químicos. O magma pode se formar em profundidades maiores ou menores. Há magmas que se originam no interior da crosta terrestre, enquanto alguns outros podem ter sido formados no próprio manto. Normalmente as temperaturas encontradas em magmas variam entre 700 e 1.200°C. Quando o magma atinge a superfície da Terra e extravasa, passa a se denominar *lava*.

A velocidade de resfriamento depende de diversos fatores que controlam e determinam a velocidade com que a massa de rochas perde calor e simultaneamente sofre eventual escape de gases e vapor d’água. Ao se iniciar o resfriamento, alguns minerais de ponto de fusão mais alto começam a se formar. Sendo assim, os magmas em geral são formados por uma parte líquida e outra sólida, constituída por minerais silicáticos já cristalizados e eventuais fragmentos de rocha sendo transportados em meio à massa fundida, juntamente com os gases que normalmente estão presentes no magma, notadamente vapor de água e gás carbônico.

Na superfície a lava sofre *consolidação*, pois a perda de calor é mais rápida. Até mesmo no interior de uma grande massa de

lava exposta à superfície, a primeira “casca” de rocha endurecida que se forma constitui uma espécie de “cobertor” térmico que dificulta a perda de calor, havendo tempo para que ocorra *crystalização*, processo bem mais lento. No primeiro caso, as rochas assim formadas chamam-se *rochas vulcânicas*, enquanto as formadas sob grandes profundidades na crosta recebem o nome de *rochas plutônicas*. Todas fazem parte da categoria das rochas magmáticas ou ígneas (formadas a partir do fogo).

Uma boa analogia para conceber em que consiste o magma – essa massa incandescente formada por rocha fundida na qual predominam minerais silicáticos – é a imagem de um copo contendo água e alguns cristais de gelo dispersos sendo lentamente resfriado: a fase líquida natural corresponde à parte fundida, enquanto a parte sólida dada por cristais de gelo corresponde à parte formada pelos cristais de minerais silicáticos que cristalizaram primeiro a partir do líquido.

A formação de uma rocha ígnea envolve diferentes etapas, desde a formação do magma abaixo da superfície, seu deslocamento (ascensão) rumo à superfície, encaixe, resfriamento e consolidação (Figura 1).

A ascensão de um magma rumo à superfície deve-se primordialmente ao fato de que o material fundido é menos denso que a rocha hospedeira. Ao ser forçado para cima, o magma em movimento na crosta acomoda-se em fraturas, mas sua mobilidade depende de diversos fatores, dos quais os mais importantes são: a composição química, o grau de cristalinidade, a proporção relativa de minerais já cristalizados, o teor de voláteis dissolvidos, a temperatura e a viscosidade; este último fator também é conhecido como grau de viscosidade e consiste na capacidade do magma de oferecer resistência ao fluxo; viscosidade é o contrário de fluidez.

A lava encontrada na Ilha Grande do Haváí, por exemplo, é bastante fluida, e possui consistência similar à do mel. Viscosidade

FIGURA 1



Massa de lava em resfriamento, junto à chaminé do Pu`u `O`o no flanco do vulcão Kilauea, Parque Nacional dos Vulcões do Haváí, EUA (fonte: http://hwo.wr.usgs.gov/archive/2004_07_28.html, foto por C. Heliker, 3/out./2003)

guarda relação direta com os teores de sílica contidos no líquido (SiO_2) e as temperaturas com que o magma se apresenta. Magmas com altos teores de SiO_2 (da ordem de 65% ou mais) possuem viscosidades maiores que magmas com baixos teores de SiO_2 (52% ou menos); magmas com baixas temperaturas normalmente possuem viscosidades maiores que magmas de altas temperaturas.

UM POUCO DE HISTÓRIA SOBRE MAGMA

Passos para caracterizar as dificuldades de se conceber o magma

As conhecidas contribuições de Abraham G. Werner e da Escola de Freiberg foram decisivas para sistematizar os estudos de rochas e trazê-los para um plano prático que pudesse ser combinado com as crescentes necessidades de aumentar a produção de carvão, ferro, chumbo, zinco e estanho desencadeadas pela Revolução Industrial (por exemplo, Guntau, 1978; Greene, 1982).

Pertence à mesma época o esforço governamental, nas metrópoles e colônias, para identificar bens naturais, dentre eles as ocorrências minerais, que aumentassem a riqueza. O esforço gerou, como resultado, os primeiros mapas e as primeiras representações de paisagens que sistematicamente incorporaram informes sobre minas, ocorrências minerais e distribuição de rochas (Ellenberger, 1983).

Na base dessas formulações de conhecimento sobre a natureza há um aspecto comum e decisivo para a ciência geológica que persiste até os nossos dias: a atividade de coletar informações diretamente no campo tornou-se mais comum; isso implica a necessidade de classificar rochas no próprio campo, provavelmente um fato único entre as ciências da natureza – a classificação

permanece como atividade importante ao lado de modernas técnicas geoquímicas, geofísicas e isotópicas e ela é praticada pelo profissional no momento em que ele está coletando os dados (Harrison, 1963; Guntau, 1978).

Abraham Gottlob Werner (1749-1817) e a Escola de Freiberg tornaram-se a referência ocidental para os estudos de rochas, bens minerais e minas. Seu método de classificar rochas passou a ser praticado por quase todos os naturalistas (Greene, 1982).

No final do século XVIII, as rochas eram divididas em primitivas, secundárias, terciárias e quaternárias. O método embutia um significativo valor às explicações químicas. Rochas primitivas, como os granitos, foram originadas pela precipitação em um mar primevo que cobriu toda a Terra – essa era a marca das rochas cristalinas. O conhecimento químico da época não atribuía especial valor ao *calor* nas transformações que eram observadas nos laboratórios (pensadores como Joseph Black ou Antoine Lavoisier representavam exceções entre estudiosos da época); analogamente, Werner e seus seguidores consideram o calor como um agente sem importância nas mudanças observadas nas rochas (Greene, 1982; Sicca & Gonçalves, 2002).

Contraopondo-se às explicações aceitas pela maioria dos naturalistas, James Hutton (1726-97) e seus seguidores defenderam que o calor interno da Terra era o agente fundamental para consolidar as rochas (Gonçalves, 1997). O calor consolidava materiais rochosos por meio do aquecimento e fusão de rochas preexistentes. O modelo que denominou *machina mundi* envolve diversas etapas: os materiais rochosos eram erodidos nos continentes, depositados no fundo oceânico, soterrados e aquecidos pelo calor terrestre até sua fusão. Na ciência moderna, Hutton apresenta a primeira fórmula consistente que fornece uma idéia cíclica de mudanças capazes de produzir a fusão das rochas (o magma). Parcela considerável de seus argumentos acha-se apoiada na química: nos mecanismos de dissolução de substâncias silicáticas, sulfurosas e betuminosas.

Evidentemente tratava-se de uma explicação inusitada para a qual não havia apoio teórico ou empírico. Pelo menos desde a época em que era fazendeiro (1755 a 1767), quando era chamado para avaliar potencial de exploração de carvão em diferentes lugares, Hutton fez cuidadosas observações para atribuir valor especial ao calor como agente capaz de consolidar rochas. Estudos de amostras ao microscópio são relatados em seu livro de 1795, no qual observa auréolas de recristalização interpretadas como líquidos fundidos que teriam envolvido os grãos minerais. O valor atribuído ao calor como agente capaz de consolidar rochas e a fusão dos materiais rochosos era impensável para os naturalistas daquela época (Hutton, 1795).

Nicolas Desmarest (1725-1815) em 1768 publicou seus estudos sobre os basaltos de Auvergne. Convencido da classificação de Werner, rejeitou que as rochas primitivas foram formadas por meio do calor. Defendeu que os vulcões não faziam parte do desenvolvimento comum da natureza, seriam apenas exceções dentro da história das rochas. Com essas idéias, argumentou que os basaltos colunares, examinados ao microscópio, encontrados em Auvergne – região central da França –, teriam origem vulcânica.

Hutton examinou com afincos os estudos de Desmarest. Evidentemente viu neles argumentos favoráveis à sua teoria. Mas também compreendeu a necessidade de encontrar argumentos de campo que pudessem refutar a abundante quantidade de dados favoráveis a Werner e seus seguidores. Para tanto, promoveu sucessivas viagens pelo interior da Escócia, a partir de 1785 (Craig, 1978).

Notas sobre as viagens possuem várias fontes. Tanto Hutton, quanto seus seguidores mencionam os achados de cada viagem. Uma das viagens mais notáveis foi ao vale do Rio Tilt. Acompanhado por John Clerk de Eldin que, além de seu diário pessoal, pintou os afloramentos visitados que servem para representar a teoria de que o granito em fusão cortou xistos e calcários identificados no local, ou seja, a um só tempo

significavam prova de que o calor é um agente importante que produzia a fusão das rochas, bem como implicavam que os granitos não poderiam ser mais considerados como rochas primitivas.

Hutton atribuiu valor especial a rochas alpinas e buscou identificá-las na Escócia. Hutton (1899) relata sua descoberta no Rio Tilt:

“[...] os planaltos da Escócia, bem como os Alpes da Suíça ou de Savóia e os demais terrenos alpinos são formados de duas coisas, montanhas de xistos e montanhas de granitos. Alguns naturalistas consideram estas montanhas como sendo as mais primitivas do globo; por outro lado, outros reconhecem as características da estratificação, supõem, então, que algo só pode ser primário em relação a outro estrato cuja origem é conhecida com certeza. Nesse caso, naturalistas têm considerado o granito como primário e o xisto supõem que é posterior; mas com a evidência que encontrei agora nesta viagem feita aos planaltos, essa idéia será inaceitável para o público quando conhecer o estado em que as coisas foram achadas [...]”.

Viagens posteriores para a ilha de Arran, Jedburgh e Siccar Point serviram para reforçar o papel do calor nos processos de consolidação e fusão de rochas, relações de campo para indicar a idade relativa das rochas (demonstrando que os granitos não eram a rocha primitiva).

Todos esses elementos serviram para formar um conjunto de seguidores da “fé” no calor como agente geológico e na consolidação provocada pela fusão. De outro lado, tudo isso não demoveu quem acreditava que era impossível ao calor do interior da Terra fundir grandes massas de rochas.

As explicações dadas aos terrenos alpinos e à origem de basaltos e granitos, nas ilhas britânicas e no continente, mantiveram-se inalteradas. Particularmente a Escócia foi o palco de intenso debate no final do século XVIII e no início do seguinte. James Hutton, James Hall, John Playfair contra John Walker, Robert Jameson. Amostras

foram comparadas, locais foram examinados e algo que inicialmente possuía pouca importância passou a ser feito: experimentos que comprovassem as explicações.

Hutton provavelmente imaginava que seria impossível reproduzir as condições de pressão e temperatura do interior da Terra para demonstrar que rochas silicáticas poderiam ser fundidas. Uma objeção crucial ao calor como agente capaz de consolidar as rochas vinha da abundância de rochas calcárias. Estudos com carbonatos (Black, 1777) mostravam que por meio do aquecimento o carbonato de cálcio liberava gás carbônico e dava origem a óxidos. Hutton levantou a hipótese de que isso não poderia ocorrer por causa da elevada pressão do interior das rochas, mas em nenhum momento imaginou demonstrar isso experimentalmente.

De outro lado, Werner não imaginava duplicar em laboratório condições de um acontecimento praticamente único do passado: a precipitação dos granitos.

Somente James Hall (1761-1832) investiu esforço para criar uma mineralogia experimental. Imaginou uma forma de mostrar que o calcário aquecido sob pressão mantinha-se como carbonato (Hall, 1812).

Para enfrentar uma das mais importantes objeções dos seguidores de Werner, a origem obviamente química dos calcários que rapidamente se decompõem sob calor, Hall testou essa noção aquecendo calcário pulverizado sob pressão dentro de um tubo de aço. Obteve resultados pouco conclusivos, em alguns casos o calcário foi aglutinado em uma massa rochosa, em outros houve só cimentação do calcário.

Na série de experimentos sobre basaltos e granitos, Hall foi mais bem-sucedido. Era conhecido que fusão de substâncias terrosas gerava vítreas. Portanto, se a teoria de Hutton fosse correta, seria difícil ver como o granito e o basalto adquiriam sua aparência cristalina. Hall mostrou que quando o vidro esfriava lentamente adquiria uma aparência cristalina mas, se fosse reaquecido e esfriado rapidamente, voltava a ser vítreo. Repetiu experimentos semelhantes com lava moída produzindo vidro ou materiais cristalinos a

partir do mesmo material, dependendo da velocidade de esfriamento.

Em resposta, Robert Jameson (1774-1854) procurou reproduzir os experimentos e afirmou obter resultados diferentes.

Um ponto central emerge: o debate não pode ser resolvido por meio de teste experimental. De fato, a conclusão principal alcançada é que seria necessário obter uma maior quantidade de dados de campo para dirimir as dúvidas que surgiram. Em síntese, isso decorre de algo nuclear na geologia: os experimentos não podem reproduzir toda a complexidade, nem as escalas de tempo e espaço da natureza.

George Bellas Greenough (1778-1856) tentou uma atitude equidistante nessa disputa (Greene, 1982; Dean, 1992). Começou examinando os argumentos expostos pelos oponentes usando o *Mineralogy of Scottish Isles* de Jameson (publicado em 1800) e *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth* de Playfair (publicado em 1802) e, em 1805, foi visitar os locais indicados nas obras.

Em julho de 1805, Greenough visitou Siccar Point, a grande junção dos estratos primitivos e secundários descoberta por Hutton em 1786. Três dias depois, reuniu-se com Hall em Edimburgo para examinar os diques basálticos de Salisbury Crags. Hall descreveu seus experimentos e afirmou que o calor e a pressão transformavam o calcário em mármore.

Greenough retornou sozinho a Salisbury Crags para examinar os contatos entre basalto e arenito, onde este se encontra endurecido. Sob sua própria análise, a explicação huttoniana de Hall pareceu menos conclusiva pois encontrou arenitos endurecidos fora das áreas dos basaltos. Greenough atribuiu o endurecimento à dissolução de jaspe e manteve essa explicação. Claramente a idéia do que chamamos metamorfismo de contato defendida por Hutton e Hall não foi aceita.

Greenough deixou Edimburgo impressionado com a grandeza do conjunto geológico. A idéia de Hutton da desintegração das rochas e erosão tornou-se plausível para ele. A enorme escala de tempo geológico

advogada por Hutton, bem como por outros naturalistas da época, foi largamente aceita por Greenough.

Prosseguindo viagem pelas costas da Escócia e Irlanda, Greenough ficou muito cético diante das explicações tanto de seguidores de Werner, quanto de Hutton. Não havia uma massa de calcários dentro dos basaltos e, quando havia calcários, por que eles não se transformaram em mármore? De outro lado, Werner ensinava que rochas bem cristalizadas eram primárias, mas muitos basaltos de Edimburgo eram nitidamente secundários. Portanto, permaneceu o papel do calor.

Todas essas discussões e disputas ficaram restritas ao domínio britânico, pouca atenção foi dada a elas na Europa continental. Ao longo do século XIX, houve aceitação crescente da importância da ação vulcânica, da intrusão e levantamento plutônicos. Mas isso não representou uma vitória de Hutton, pois foi obtida por estudos independentes que recuperaram uma tradição abandonada no século XVII. Dados cruciais foram as observações do gradiente geotérmico (aumento de temperatura com a profundidade, algo observado nas minas subterrâneas).

Estudos experimentais, observações de amostras ao microscópio foram conduzidos de modo que, ao final do século XIX, os naturalistas sustentaram a origem ígnea de granitos e basaltos e, portanto, havia uma fonte de rocha fundida, o magma.

Isso só aparentemente tranquiliza a idéia de aceitação do magma. Outros tantos problemas foram introduzidos durante o século XX.

Magma ou conto de fadas?

No início de sua obra marcante publicada originalmente em 1928, Norman Levi Bowen afirma:

“A acumulação de conhecimento mineralógico e das características químicas de rochas ígneas conduziu a uma generalização aceita

pelos petrólogos. Rochas de uma certa região, que foram intrudidas em um período definido, tendem a exibir certas similaridades de composição mineral e química que persistem na diversidade e marcam de forma mais ou menos distinta as rochas, ou seja, são diferentes de rochas de outra região, ou intrudidas em outra época [...]”.

Embora o texto seja simples e direto, adota um pressuposto difícil de delimitar sem qualquer dúvida: como delimitar corpos de rochas ígneas que possuam a mesma composição? Ou seja, como ter clareza sobre a classificação dessas rochas?

Harrison (1963) assinalou esse problema: geólogos de uma mesma geração produzem mapas muito similares de certa área e geólogos de épocas diferentes produzem mapas muito distintos da mesma área.

A expressão mais bem elaborada do conhecimento que temos sobre magma e rochas magmáticas é representada pelos *mapas geológicos* nos quais a distribuição espacial de tipos litológicos e suas relações estruturais descrevem os materiais presentes para que se possam fazer previsões sobre o uso da superfície ou dos recursos naturais. Harrison (1963) expõe um conceito mais formal: o mapa geológico é um índice do conhecimento geológico da época de sua elaboração e é a base da investigação futura. É um veículo de comunicação dos descobrimentos que foram feitos na natureza e na crosta terrestre. O mapa pode ser considerado como uma força dinâmica da geologia.

Mas como as descobertas podem mudar tanto de uma época para outra? Todas as vezes que houver controvérsia sobre a origem de uma formação geológica, sobre qual é a melhor classificação de rochas magmáticas e da delimitação de seus corpos, os mapas – os produtos do conhecimento – serão diferentes e dependentes do que aqueles profissionais “acreditam” ser os dados e fatos verdadeiros.

Nos termos de Harrison (1963), bons mapas são aqueles que descubrem as deficiências das teorias, da interpretação experimental ou da classificação.

E é absolutamente inelutável que gerações de geólogos diferentes produzem mapas diferentes. Assim como a afirmação de Harrison (1963), um conjunto de observações sucessivas põe em xeque modelos construídos em laboratório e, dessa maneira, a delimitação do magma, sua origem e sua história são modificadas ao longo do tempo. Trata-se de um excelente exemplo da plasticidade decorrente das dificuldades que já estavam presentes nas controvérsias dos séculos XVIII e XIX.

Como delimitar um granito? Como estabelecer sua posição estratigráfica? Como relatar sua história? O modelo explicativo de Bowen trouxe significativo avanço do conhecimento durante décadas, mas as dificuldades de campo trouxeram dúvidas, tais como: o corpo granítico posto em um terreno metamórfico é resultado de diferenciação ou de metassomatismo? Ou seja, gradualmente a firme base experimental dos estudos de Bowen revelou-se limitada e acabou substituída por outras explicações. O cruzamento de dados experimentais e de observações diretas da natureza caracteriza um modelo complexo de construção científica. A verificação de que algumas rochas ricas em hornblenda e piroxênio eram derivadas de sedimentos calcários pôs em dúvida a diferenciação magmática.

Em síntese, como Frodeman (1995) assinalou, todo o conhecimento geológico é interpretativo e hipotético. Isso é inerente à própria ciência.

Krauskopf (1968) traz o exemplo do granito do Monte Barcroft (Serra Nevada, EUA). A delimitação dos corpos plutônicos possui uma forte influência de decisões práticas de campo que, embora racionais e aceitáveis, não podem ser logicamente assumidas. O número de corpos que foi definido, sua distribuição e suas relações estruturais admitem distintas interpretações sobre a história magmática do batólito.

Tais modelos interpretativos operam com evidências contraditórias. Mas como tratá-las? A pesquisa é necessária. Mais pesquisa, mais dinheiro, técnicas mais refinadas. Isso pode durar séculos...

Frodeman (2000) ressalta que devemos continuar insistindo com a geologia apesar das suas controvérsias, apesar de seu caráter interpretativo e que, também, devemos manter o próprio termo ao invés de palavras “mais modernas” (Geociências, Ciência do Sistema Terra, etc.). Ele relembra que, no grego antigo, *Ge* ou *Gaia* diz respeito ao sentimento de solo, mas também ao de Terra Mãe, fonte da vida, bem como ao campo e à terra natal. Geologia pode também ser tomada como a pesquisa por causa do *logos* – daí, podemos completar que é o planeta que chamamos de terra natal. Mesmo que não tenhamos certeza sobre o *magma*.

FONTES DO CALOR INTERNO DA TERRA

No início da formação do Sistema Solar, as colisões que a Terra sofreu com os corpos chamados planetesimais e outros corpos maiores provocaram impactos geradores de calor.

A Terra formou-se a partir de gases e fragmentos frios. À medida que sucessivas colisões ocorreram, a temperatura foi elevada. Os violentos choques produziram um globo de material fundido. Do resultado da fusão houve separação de materiais mais densos (ferro, níquel e outros metais) e os materiais rochosos (silicáticos) menos densos. Graças a esses processos de diferenciação gravitacional, o ferro, níquel e metais pesados se concentraram no núcleo terrestre; em paralelo, o manto acumulou silicatos de alto ponto de fusão. Assim, a origem do calor interno da Terra relaciona-se com a diferenciação gravitacional e as colisões, que converteram em calor grande parte da energia cinética (energia de movimento) de grandes massas então existentes. Outra forma de geração de calor é a desintegração radioativa de diversos elementos químicos densos, fenômeno que continua a acontecer, sobretudo no interior da crosta terrestre (Anguita & Moreno, 1993).

Quando a temperatura da superfície caiu, nela se formou uma camada sólida (a primeira litosfera) de rochas mais densas, sobretudo silicatos de magnésio (sima) e rochas menos densas, de silicatos de alumínio (sial). Sabe-se que essa litosfera já existia há mais de 4 Ga. Em tempos modernos, a evolução do planeta passou a envolver dinâmica própria de movimentação de grandes placas litosféricas, que caracteriza a chamada *tectônica de placas* (ver Kious & Tilling, 1994; Carneiro, 2000), também conhecida como tectônica global.

TIPOS DE ERUPÇÕES

Ao atingir a superfície da Terra o magma forma um respiradouro; progressivamente acumula-se mais material na câmara magmática, que pode entrar em erupção explosiva ou não-explosiva. As erupções não-explosivas são favorecidas por baixo conteúdo em gases e magmas de baixa viscosidade (magmas basálticos a andesíticos). Normalmente começam com fontes de fogo devido à liberação de gases dissolvidos e produzem fluxos de lava na superfície, que escorrem pelas encostas do vulcão que então se forma; caso irrompam embaixo d'água, podem produzir as chamadas lavas almofadadas (*pillow lavas*).

As erupções explosivas de um determinado magma são favorecidas por alto conteúdo em gases e pela alta viscosidade (características presentes nos magmas andesíticos e riolíticos). Em termos bastante simplificados, a expansão de bolhas de gás sofre resistência pela alta viscosidade do magma, resultando em pressões; por sua vez, a alta pressão em bolhas de gás força as bolhas a explodir ao alcançar a baixa pressão da superfície da Terra e estas últimas, ao arrebentar, fragmentam o magma em piroclastos e cinza vulcânica, conhecida tecnicamente sob o nome de *tefra*. Quando ascendem a partir do vulcão, nuvens de gás e tefra produzem colunas de erupção que podem atingir até 45 km de altura na atmosfera.

Identificação de rochas magmáticas

A seguir examinaremos brevemente algumas formas usuais de reconhecer e classificar rochas ígneas. Você pode começar sua pesquisa simplesmente prestando atenção na pia de sua casa, ou locais menos prosaicos, como o próprio chão onde pisa em aeroportos, estações de trem e metrô, *shopping centers*, além de balcões de lojas, padarias, lanchonetes, etc. Em todos esses lugares é muito comum o emprego de variedades belíssimas de rochas, geralmente muito resistentes à abrasão mecânica.

A melhor maneira de começar a conhecer rochas ígneas é visitar uma marmoraria, que são empresas produtoras de lajes de rocha polida utilizadas para revestimento e ornamentação. Com a devida ressalva ao fato bem conhecido de que os nomes comerciais utilizados pelos produtores – “mármores” e “granitos” – não correspondem às denominações técnicas usuais de rochas, você pode começar a caracterizar alguns exemplos de rochas ígneas. Sua pesquisa será frutífera se conseguir identificar pelo menos um exemplar de rocha ígnea. Nesses lugares, há restos de rochas de grande utilidade para quem pretende iniciar uma coleção (ver Carneiro, 2000). Recolha pedaços descartados de rochas relativamente pequenos e que possuam faces quebradas (não-serradas). Nas superfícies das amostras podem-se observar os minerais componentes da rocha. Se a amostra que separou for do tipo chamado de “granito”, observe se é possível identificar cristais, que são partes da rocha com coloração uniforme e que muitas vezes exibem faces planas, ou seja, faces que refletem a luz, dependendo de como estiverem sendo iluminadas.

Lembre-se de que alguns conhecimentos são importantes para ajudá-lo na investigação.

1) *Rochas vulcânicas* formam-se a partir da solidificação relativamente rápida de material fundido que atingiu a superfície, através de fendas e crateras de vulcões.

2) *Rochas plutônicas* formam-se no interior da crosta terrestre pelo lento resfriamento de material fundido durante milhões de anos.

3) *Rochas metamórficas* formam-se abaixo da superfície terrestre graças à lenta transformação de rocha preexistente que tenha sofrido a ação combinada de calor e pressão.

4) *Rochas sedimentares* formam-se abaixo da superfície terrestre, sob profundidades da ordem de dezenas, centenas até alguns milhares de metros, a partir da compactação de sedimentos, geralmente depositados em camadas.

Examine a rocha com uma lupa e procure distinguir os minerais constituintes; considere a cor, o brilho, a forma e o tamanho. Verifique se a rocha é compacta, fosca ou brilhante (ver *box* nesta página). Se puder perceber alguma orientação de cristais, como se fossem folhas de papel (foliação), isso pode significar que a rocha é metamórfica. Em rochas ígneas é raro haver evidências de deformação nos componentes. Se a rocha não possuir qualquer cristal visível a olho nu, isso pode significar que é uma rocha vulcânica, porque o rápido resfriamento não permite a formação de cristais de tamanho razoável.

CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS MAGMÁTICAS

- aspecto maciço ou compacto;
- grãos imbricados em rochas cristalinas;
- distribuição espalhada e homogênea; ausência de camadas ou estratos;
- presença eventual de poros, cavidades, espaços vazios e/ou amígdalas, observáveis a olho nu; característica restrita a algumas rochas vulcânicas, como pedra-pomes e outras;
- constituintes com formas irregulares ou geométricas, jamais arredondados mecanicamente, mas às vezes redondos devido à cristalização;
- ausência de orientação ou foliação

Importância do estudo de magmatismo no Brasil

Um país como o Brasil, de dimensões continentais e complexa história geológica, possui registros abundantes de rochas ígneas, formadas a partir da consolidação de lavas em superfície, como os basaltos acima referidos, ou da cristalização de magmas (sob profundidades menores ou maiores), como os incontáveis corpos de granito, de diferentes partes do país, alguns dos quais explotados em função de mineralizações metálicas de grande interesse industrial, enquanto outros são extraídos em blocos e placas, como rochas ornamentais. Nosso território continental encerra, ainda, uma das mais expressivas manifestações magmáticas do planeta, os basaltos do vulcanismo Serra Geral, cuja idade coincide com a separação continental cujos processos culminaram no definitivo desligamento da América do Sul e da África.

Épocas marcadas por intensa atividade vulcânica, no passado da Terra, ficaram também conhecidas como épocas de mudanças significativas do clima terrestre. Assim, o tema das mudanças globais, que tem despertado enorme interesse na mídia, requer mais profunda compreensão do vulcanismo e dos fatores que o determinam. Sabe-se que o funcionamento dos sistemas climáticos é em parte controlado por interações nas quais os vulcões exercem papel decisivo, na medida em que expelem gás carbônico (um dos gases do efeito estufa), vapor de água, poeira e outros gases na atmosfera. A dinâmica atmosférica é portanto afetada diretamente pela ação do magma.

Os exemplos da importância moderna do conhecimento sobre vulcões, ao lado de outros incontáveis exemplos de rochas brasileiras formadas a partir de magma em diferentes épocas e momentos evolutivos, revelam a importância do estudo das rochas ígneas. Estudo relevante tanto sob o ponto de vista científico, para entendimento dos

ambientes formadores de rochas na história geológica do planeta onde vivemos, como do ponto de vista econômico, considerando-se que as condições formadoras de

rochas magmáticas são também geradoras de expressivos depósitos minerais metálicos e não-metálicos de grande valor econômico.

BIBLIOGRAFIA

- ANGUITA VIRELLA, F.; MORENO SERRANO, F. *Processos Geológicos Internos*. Madrid, Rueda, 1991.
- BLACK, J. *Experiments Upon Magnesia Alba, Quick Lime, and Other Alkaline Substances*. Edinburgh, W. Creech, 1777.
- BOWEN, N. L. *The Evolution of Igneous Rocks*. Original de 1928. New York, Dover Publications, 1956.
- CARNEIRO, C. D. R. (editor cient.). *Geologia*. São Paulo: Global/SBPC – Projeto Ciência Hoje na Escola, 2000 (Série Ciência Hoje na Escola, v. 10).
- CRAIG, Gordon Y. (ed.). *James Hutton's Theory of the Earth: the Lost Drawings*. Edinburgh, Scottish Academic Press, 1978.
- DEAN, D. R. *James Hutton and the History of Geology*. Ithaca, Cornell University Press, 1992.
- FRODEMAN, R. L. (ed.). *Earth Matters: the Earth Sciences, Philosophy and the Claims of Community*. Upper Saddle River, Prentice Hall, 209p.
- FRODEMAN, R. L. "Geological Reasoning: Geology as an Interpretive and Historical Science", in *Geol. Soc. Am. Bull.*, 107(8), 1995, pp. 960-8.
- GONÇALVES, P. W. *A Luz Invisível: o Conceito de Analogia nas Doutrinas Natural e Moral de James Hutton*. Tese de doutorado. Campinas, Inst. Filosofia e Ciências Humanas, Unicamp, 1997.
- GREENE, M. T. *Geology in the Nineteenth Century: Changing Views of a Changing World*. Ithaca, Cornell University Press, 1982.
- GUNTAU, M. "The Emergence of Geology as Scientific Discipline", in *History of Science*, v. 16, 1978, pp. 280-90.
- HALL, J. "Account of a Series of Experiments", in *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 6, 1812, pp. 71-187.
- HARRISON, J. M. "Nature and Significance of Geological Maps", in C. C. Albritton Jr. (ed.). *The Fabric of Geology*. Stanford (CA), Freeman, Cooper & Company, 1963, pp. 225-32.
- HUTTON, J. *Theory of the Earth, With Proofs and Illustrations*. Edinburgh, Cadell and Davies, 1795.
- _____. *Theory of the Earth, With Proofs and Illustrations*. Ed. by Sir Archibald Geikie. London, Geol. Society, 1899.
- KIOUS, J. & TILLING, R. I. *This Dynamic Planet: a History of Plate Tectonics*. Washington DC: U.S. Geological Survey (USGS) and the Smithsonian Institution, 1994. (URL: <http://pubs.usgs.gov/publications/text/index.html>).
- KRAUSKOPF, K. B. "A Tale of Ten Plutons", in Preston Cloud (ed.). *Adventures in Earth History*. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1970, pp. 54-70.
- MIDDLEMOST, E. A. K. *Magma and Magmatic Rocks. An Introduction to Igneous Petrology*. New York, Longman, 1985.
- OLDROYD, D. R. *The Earth Inside Out: Some Major Contributions to Geology in the Twentieth Century*. London, The Geol. Soc., 2002 (Geological Society Special Publication, 192).
- PLAYFAIR, J. *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth*. Edinburgh, Cadell, Davies, and William Creech, 1802.
- SICCA, N. A. L.; GONÇALVES, P. W. "História da Química e da Geologia: Joseph Black e James Hutton como Referências para Educação em Ciências", in *Química Nova*, v. 25, n. 4, 2002, pp. 689-95.

Sugestões de bibliografia adicional na WEB-URLs

- <http://quake.wr.usgs.gov/recenteqs/latestfault.htm>
- http://volcano.und.edu/vwdocs/site_index.html
- <http://volcano.und.nodak.edu/vw.html>
- <http://www.cartage.org.lb/en/themes/Sciences/Earthscience/Geology/RocksandMinerals/IgneousRocks/IgneousRocks.htm>
- <http://www.geo.ua.edu/intro03/ignis.html>
- <http://www.learner.org/resources/series78.html>
- http://www.uoguelph.ca/geology/2110PDF_f04/igneousIII_6.pdf
- http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/earth_materials_structure/igneous_rocks.html