

# Descrição Petrográfica de Rochas Ígneas



Apostila didática para a Disciplina  
Petrologia I



Akihisa Motoki

**DMPII**



Departamento de Mineralogia e Petrologia Ígnea  
Edição 2004

## Sumário

<b>1. História de desenvolvimento da petrologia</b>	---	1
1.1. Alvorada da petrologia	---	1
1.2. Petrologia moderna	---	2
1.3. Desenvolvimento nas últimas décadas	---	4
<b>2. Conhecimentos fundamentais</b>	---	7
2.1. Corpo, rocha e mineral	---	8
2.2. Rochas ígneas, sedimentares e metamórficas	---	9
2.3. Estrutura do Planeta Terra e geração do magma	---	8
2.4. Energia interna do Planeta Terra	---	17
2.5. Desenvolvimento no futuro	---	32
<b>3. Classificação de rochas ígneas</b>	---	34
3.1. Critérios de classificação	---	34

# 1. História de desenvolvimento da petrologia

Desde a época do Império Romano, a humanidade já conhecia presença de diversos tipos de rochas. Certos nomes de rochas atualmente utilizados, tais como basalto e sienito, são originados daquele tempo (Fig. 1.1). Mas, **descrições científicas e classificações organizadas de rochas** iniciaram-se apenas no final do século XVIII, por meio de observações a olho nu e a lupa. No século XIX, foi introduzido o microscópio equipado com polarizadores ópticos. Este instrumento possibilitou a identificação exata dos minerais constituintes e classificação quantitativa de rochas. Tal estudo, que constitui uma parte da petrologia, é denominado **petrografia**.

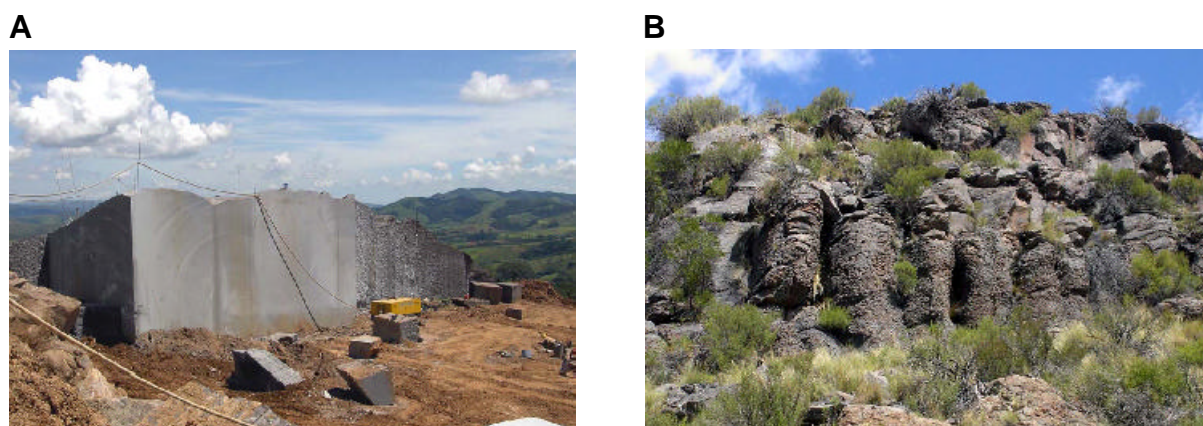


Fig. 1.1. Vistas macroscópicas das rochas conhecidas desde a época do Império Romano, sienito e basalto: (A) álcali sienito, Caldas - Minas Gerais; (B) álcali olivina basalto, Agua Escondida, Provincia de Mendoza, Argentina.

## 1.1. Alvorada da petrologia

A **petrografia** do sentido moderno foi fundada no final do século XVIII por A.G. **Werner** (1749-1817), que trabalhou em Bergakademie Freiberg (Academia de Mineração de Freiberg, Alemanha). Os estudos dele foram baseados apenas em **observações a olho nu e lupa**, por isso, as descrições foram parciais e limitadas. Por exemplo, não houve como observar a composição mineralógica de rochas com granulometria muito fina, ou seja, rochas constituídas por minerais pequenos, indistinguíveis a olho nu. Ele considerou que todas as rochas, sejam estas, granito ou basalto, foram originadas de materiais depositados no oceano primitivo hipotético que cobria a Terra inteira. Naquele tempo, a origem do Planeta Terra ainda não era tão esclarecida como no presente. A idéia dele é chamada de **neptunismo**. Ele atribuiu vulcanismos à combustão de carvão mineral em locais profundos. A presença de oxigênio e sua função química ainda não eram conhecidas. Sob ponto de vista atual, a teoria dele é considerada como problemática, por outro lado, as descrições das amostras de mineral foram excelentes. Uma parte da coleção dele está conservada no Museu Nacional do Rio de Janeiro.

Na mesma época, apareceu um aristocrata inglês **J. Hutton** (1726-1797) que se dedicou a ciências de vários ramos. Ele reconheceu a existência de **calor subterrâneo**, e considerou este calor como causa fundamental da **geração de magmas** e atividades vulcânicas. A expansão da Terra, a paradigma daquele tempo, e as atividades tectônicas eram interpretadas como

consequência do calor subterrâneo. Ele observou um afloramento de dique, ou seja, corpo intrusivo de forma tabular e, de composição granítica, considerando que este granito é de origem magmática e as rochas encaixantes foram metamorfoseadas pelo calor do magma. Quase 100 anos depois, as pesquisas dele foram publicadas na forma de um livro intitulado “Theory of the Earth” (1895). A idéia dele, denominada **plutonismo**, explica que nem todas as rochas são sedimentares, mas existem rochas originadas do resfriamento e consolidação de magmas, denominadas **rochas ígneas**. Além disso, existem rochas transformadas pelo calor e pressão subterrâneos em estado sólido, chamadas de **rochas metamórficas**. Por outro lado, as rochas formadas a partir de sedimentação são denominadas rochas **sedimentares**. Após o falecimento deles, houve muitas discussões entre os neptunistas e os plutonistas, e até a década de 1920, o plutonismo chegou a prevalecer no mundo científico.

Juntos com J. Lamark e C. Lyell, J. Hutton é conhecido, também, como fundador do **uniformitarismo**, um princípio importante na geologia: **Tanto os fenômenos antigos quanto os atuais são controlados pelas mesmas leis físicas e químicas**. O uniformitarismo enfrentou violentas reações do “catastrofismo”, que considerava os acontecimentos antigos, sobretudo os que aparecem na Bíblia, como sendo controlados pela força incomum. Os dois grupos chocaram-se em vários pontos, sobretudo na real existência, ou não, do dilúvio lendário. Através de trabalhos científicos, os uniformitaristas provaram cientificamente a inexistência do referido dilúvio. Até o presente, o termo “depósito diluvial” está sendo utilizado na geologia, porém, de outro significado, que corresponde aos depósitos sedimentares do Quaternário.

## 1.2. Petrologia moderna

No meio do século XIX, foram iniciadas **análises químicas de rochas**. O **microscópio**, que foi inventado na mesma época, provocou revoluções drásticas nos estudos de rochas e minerais. Junto com a aplicação da técnica de **lâmina delgada**, este instrumento possibilitou análise de rochas de granulometria muito fina e estudo detalhado de cada mineral. A lâmina delgada é película fina de rocha com 30  $\mu\text{m}$  de espessura, preparada para observação microscópica. A invenção posterior do **polarizador** por W. Nicol, em 1928, causou outra revolução, aperfeiçoando a técnica de identificação e classificação de minerais, ou seja, mineralogia óptica (Fig. 1.2). O microscópio equipado de polarizadores é chamado de **microscópio petrográfico**. Através disso, a petrografia microscópica foi estabelecida até o início do século XX, principalmente por pesquisadores alemães e franceses: H.C. **Sorby** (1858; On the mineralogical structure of crystals), F. **Zirkel** (1866; Lehrbuch der Petrographie), A. **Michel-Lévy**, K.H.F. **Rosenbusch** (1877; Microscopische Phisiographie der massigen Gesteine), etc. Entre eles, Rosenbusch é conhecido como o fundador da petrografia de rochas do Brasil. Estes trabalhos,

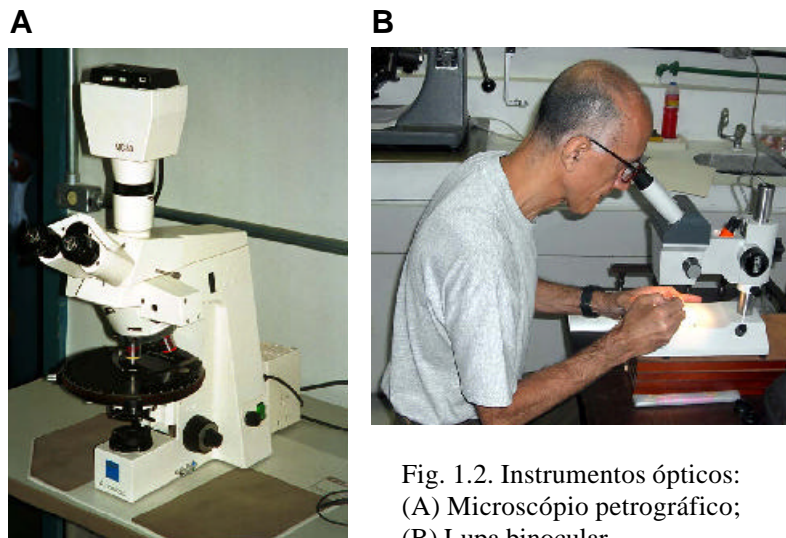


Fig. 1.2. Instrumentos ópticos: (A) Microscópio petrográfico; (B) Lupa binocular.

considerados como a petrografia moderna, foram escritos na forma de livros de quatro volumes por A. **Johannsen** (1931; A descriptive petrography of the igneous rocks).

Após o estabelecimento da petrografia descritiva, os pesquisadores se interessaram mais pela **gênese das rochas**, criando a **petrologia**. No início do século XX, F. **Becke** desenvolveu conceito de **províncias petrográficas** através de trabalhos geoquímicos, e classificou faixas metamórficas por meio de condições de pressão e temperatura (1903; Ueber Mineralbestand und Struktur der Kristallinen Schiefer). J.H.L. **Vogt** interpretou magmas como silicatos que formam um **sistema eutético**, e estabeleceu diagramas de fase de minerais félsicos, que são compostos principalmente de Si, Al, Na e K, com baixo teor de Fe e Mg (1903-1904; Die Silikatschmelzlosungen). A. **Harker** relacionou tipos de rochas ígneas com as **condições tectônicas**: Nas regiões tectonicamente compressivas ocorrem magmas não alcalinos, e nas distensionais, magmas alcalinos (1909; The natural history of igneous rocks). Nesta publicação, Harker chamou as rochas não alcalinas como “tipo pacífico”, e as alcalinas como “tipo atlântico”.

No início do século XX, foi fundado, em 1907, o **Carnegie Institute - Washington**, que inclui **Geophysical Laboratory**. Neste laboratório foram realizados **estudos de fusão e consolidação** de várias rochas naturais e artificiais em condições controladas, denominados de **petrologia experimental**. N.L. **Bowen** trabalhou neste laboratório e propôs a **teoria de fracionamento magmático**, isto é, um modelo de evolução química do magma por meio de resfriamento. Um **magma primário basáltico**, gerado no manto a partir da fusão parcial, **fraciona-se em outros magmas de diversas composições** químicas através da **crystalização e afundamento de minerais**, o fenômeno denominado **crystalização fracionada** (1925; The evolution of igneous rocks). Nas **décadas de 1950 e 1960**, vários pesquisadores de diversas nacionalidades, H.S. **Yoder**, C.E. **Tilley**, J.F. **Schairer**, I. **Kushiro**, M.J. **O’Hara**, D.H. **Green**, A.E. **Ringwood**, etc., pesquisaram neste laboratório **processos de geração dos magmas primários e sua evolução**, sem influência de materiais voláteis (estado seco), com o auxílio do aparelho **piston-cilinder** que é capaz de produzir pressões de até **5 Gp** (gigapascal) ou seja 50 kb (kilobar), que corresponde à **pressão do manto superior**. A unidade “kb” corresponde 1000 atms. e “Gp”, a 10000 atms. Internacionalmente, a unidade kb tende a ser menos utilizada, sendo substituída por Gp. Posteriormente, os **efeitos dos materiais voláteis** contidos no manto, sobretudo **H<sub>2</sub>O**, chamaram a atenção dos experimentalistas, e foram realizados muitos experimentos com materiais voláteis (estado úmido). Os materiais voláteis abaixam a temperatura de fusão e mudam a composição do magma primário. Na década de 1970, o **efeito do CO<sub>2</sub>** na fusão parcial chamou atenção para a gênese dos **magmas primários ultramáficos e carbonatíticos**. As pesquisas estabeleceram uma visão geral da gênese e evolução dos magmas, e portanto, as idéias clássicas de rochas ígneas se transformaram em grande escala até o ano 1970.

Na mesma época, houve desenvolvimentos de **geoquímica de isótopos**, juntos com as **datações geocronológicas radiométricas**, causando mais um avanço. A datação geocronológica corresponde à determinação da idade de rocha ou mineral por meio de estudos isotópicos. O sistema de desintegração radioativa de Rb-Sr e a **razão inicial de Sr**, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr, forneceram informações sobre o local de geração do magma dentro do manto. Os comportamentos de **isótopos de oxigênio** e os **elementos terras raras (REE)**, ou seja os elementos da série lantanídeos, atraíram o interesse dos geoquímicos sob ponto de vista da origem dos **magmas primários** e as **rochas mãe do manto** que geraram os magmas. A teoria da tectônica de placas foi estabelecida naquela época e aplicada para explicar as variedades químicas de magmas primários de acordo com as condições tectônicas. Posteriormente, junto com a razão inicial de Sr, o sistema de desintegração Sm-Nd e a **razão inicial de Nd**, <sup>144</sup>Nd/<sup>143</sup>Nd, e os sistemas U-Pb e Th-Pb e as **razões isotópicas de chumbo**, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb e <sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb, chegaram a serem utilizadas para discussão das características geoquímicas das rochas mães do manto.

O **Projeto Apollo** realizou as expedições lunares com tripulação durante 1969 a 1972 e trouxe importantes amostras de **rochas lunares**. Logo depois, o **Projeto Luna** trouxe amostras de **solos lunares** por meio das expedições sem tripulação durante 1973 a 1974. Nas expedições do Continente **Antarctica**, sobretudo do Japão, encontraram-se um imenso número de **meteoritos** presentes dentro do gelo e, entre essas, encontraram-se **rochas lunares e marcianas**. As pesquisas destas rochas extraterrestres revelaram os acontecimentos na época da formação do Sistema Solar e mudaram fundamentalmente o conceito geral da origem do Planeta Terra. Ao contrário da consideração que se acreditava até a década de 1970, a Terra nasceu como uma bola de fogo, cuja superfície era coberta por **oceano do magma**. As viagens de **naves interplanetárias**, Voyager

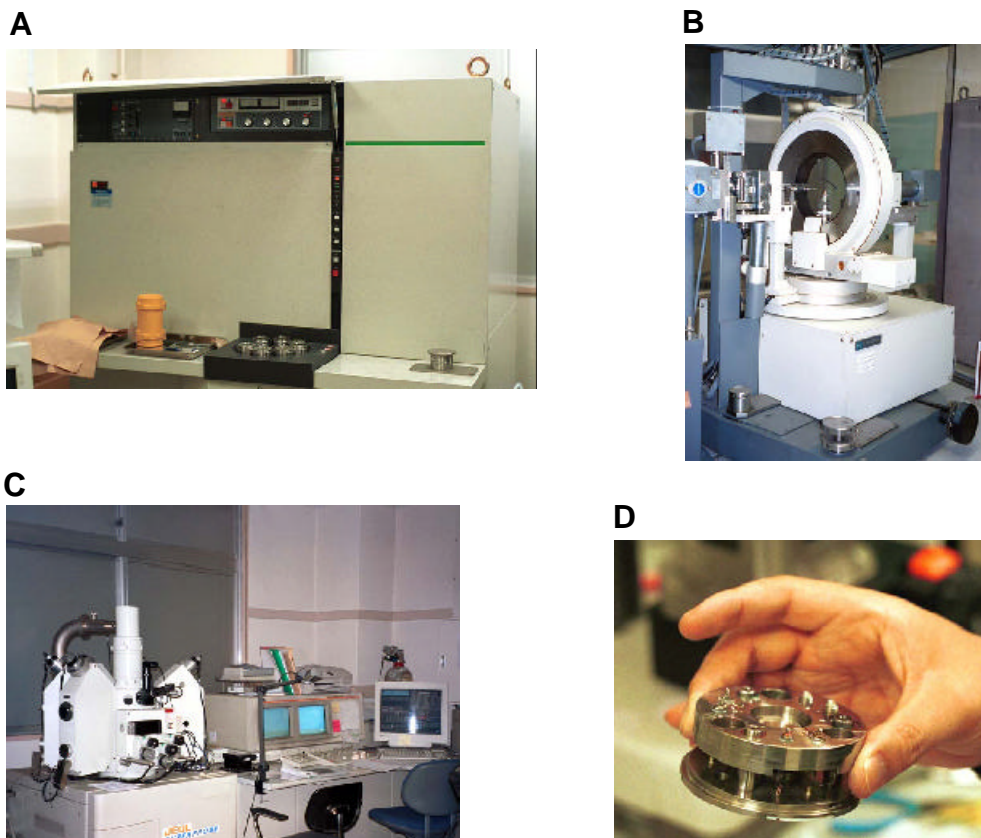


Fig. 1.3. Equipamentos modernos de análises petrológicas e geoquímicas: (A) fluorescência de Raios-X, Tokyo Institute of Technology, Japão, para análises químicas de elementos principais e menores em rocha total; (B) difratômetro de Raios-X de quatro eixos, Hirosaki University, Japão, para análises cristalográficas de minerais em pó; (C) microsonda eletrônica para análises químicas de elementos principais em pequena área, Tokyo Institute of Technology, Japão; (D) diamond window cell para ensaios em condição do manto inferior e do núcleo externo, Kyoto University, Japão.

I, Voyager II, Galileu, etc., estão reconfirmando e detalhando a nova idéia. Portanto, os modelos sobre os magmatismos nas eras muito antigas estão em reconsideração (Fig. 1.3).

### 1.3. Desenvolvimento nas últimas décadas

Na década de 1980, foi proposto o modelo de geração do **magma primário andesítico** sob forte **influência de H<sub>2</sub>O**. Tal magma, denominado magma primário **adakítico**, é gerado em

50 a 70 km de profundidade por meio da fusão da crosta oceânica presente na superfície do slab em subducção, de composição de hornblenda eclogito, o fenômeno denominado “slab-melting”. Este tema é um dos focos atuais da petrologia ígnea, mineralogia e geoquímica e, portanto intensas pesquisas estão sendo realizadas na região sul da Patagônia, onde ocorre a subducção de cadeia meso-oceânica.

A evolução do aparelho **diamond window cell** possibilitou ensaios em pressão extremamente alta, acima de **100 Gp**, correspondente ao **núcleo externo**. Na década de 1990, foram esclarecidos as propriedades físicoquímicas dos minerais do manto inferior e os fenômenos que ocorrem no manto inferior e o núcleo externo.

A coligação de **dados isotópicos** de Sr, Nd e Pb possibilitaram mais um avanço nas pesquisas isotópicas e, a partir da década de 1990, as pesquisas do sistema Re-Os e **razão isotópica de Os**,  $^{183}\text{Os}/^{182}\text{Os}$ , e, estão em desenvolvimento. Após o ano 2000, a **razão isotópica de He**,  $^4\text{He}/^3\text{He}$ , e o sistema Hf-W e razão isotópica W/W, estão chamando atenção sob ponto de vista da origem dos magmas kimberlíticos e segregação do manto e o núcleo. Atualmente, os REE presentes em zircão estão revelando os acontecimentos desde a formação do magma primário até a chegada para a superfície. As inovações científicas foram possibilitadas freqüentemente por desenvolvimento de novos aparelhos de análises de área muito pequena, denominando-se análises em spot (pin-point). Uma grande utilidade das análises em spot é determinação química e isotópica de inclusão de vidro dentro dos minerais, denominada melt-inclusiton. Os aparelhos utilizados são **microsonda eletrônica** de modelos modernos (EPMA) para análises químicas em spot de diâmetro inferior a 2 micrômetros, **SIMS** (secondary ion mass spectrometer) para análises químicas e isotópicas em spot de diâmetro de 15 micrômetros, **LA-ICPMS** (laser ablation inductive coupled mass spectrometer) para análises químicas e isotópicas em spot de diâmetro de 16 micrômetros, espectrômetro de **Laser Raman**, para análises mineralógicas de tamanho inferior a 3 micrômetros, etc. (Fig. 1.4).

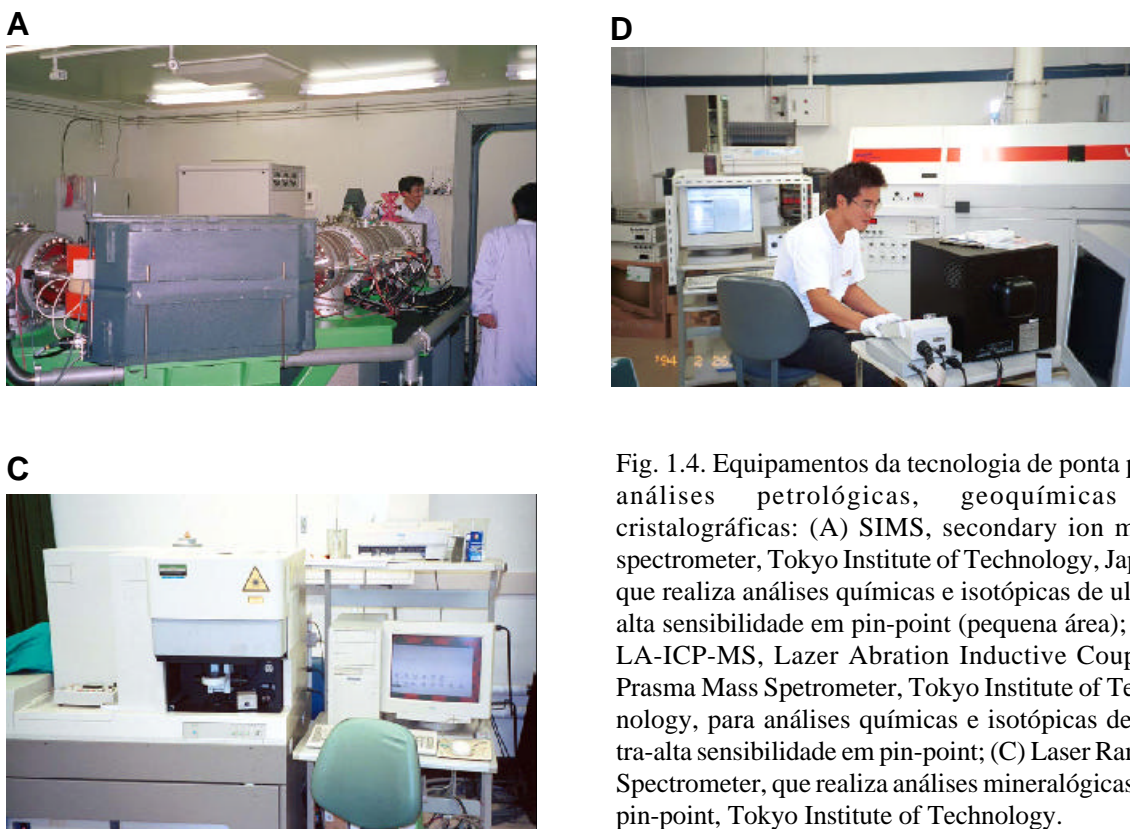


Fig. 1.4. Equipamentos da tecnologia de ponta para análises petrológicas, geoquímicas e cristalográficas: (A) SIMS, secondary ion mass spectrometer, Tokyo Institute of Technology, Japão, que realiza análises químicas e isotópicas de ultra-alta sensibilidade em pin-point (pequena área); (B) LA-ICP-MS, Lazer Ablation Inductive Coupled Plasma Mass Spectrometer, Tokyo Institute of Technology, para análises químicas e isotópicas de ultra-alta sensibilidade em pin-point; (C) Laser Raman Spectrometer, que realiza análises mineralógicas em pin-point, Tokyo Institute of Technology.

Conforme a explicação acima, a utilização de **novos equipamentos revolucionou** a ciência da Terra. Para que ocorra isso, os usuários, ou seja, os geólogos, precisam ter o **nível de inteligência suficiente** para aproveitar os equipamentos de forma adequada e eficiente. Além disso, as amostragens e descrições do campo também devem ser feitas conforme os objetivos das análises. Sem isso, os equipamentos não produzem nenhuma novidade científica. Desta forma, os **fatores definitivos** de bons trabalhos de geologia são **inteligência e condição física**, tanto no campo quanto nos laboratórios (Fig. 1.5).



Fig. 1.5. Trabalho de campo é o fator fundamental da geologia. No ano 2000, Chirstoph David Parkinson, Akihisa Motoki e Kenji Freire Motoki realizaram trabalhos de campo, encontrando novas descobertas.