

**ORIENTAÇÕES PARA ELABORAÇÃO DE
PROJETOS DE RECURSOS MINERAIS
(RECURSOS METÁLICOS E NÃO METÁLICOS)**

1. INTRODUÇÃO

Os levantamentos geológicos consistem na parte central dos trabalhos de pesquisa realizados pelo Serviço Geológico do Brasil/CPRM. A coleta de dados metodologicamente correta resulta em produtos de maior qualidade, que podem embasar diversas linhas de desenvolvimento e pesquisa futuras, independente da mudança de paradigmas científicos ou avanços tecnológicos. Nesse sentido, são fundamentais o reconhecimento e a caracterização de todos recursos minerais observados nas áreas mapeadas, com detalhamento adequado à escala do trabalho e ao potencial econômico das mineralizações encontradas.

A presente instrução técnica visa padronizar as etapas da pesquisa na área de geologia econômica alinhadas com o praticado em outras áreas da empresa com intuito de entregar produtos com informações mais completas, confiáveis e de qualidade.

2. FASES E ETAPAS DE PROJETO DE RECURSOS MINERAIS

Na etapa preparatória pretende-se traçar um panorama com as ocorrências minerais conhecidas e prováveis alvos a serem examinados.

O levantamento bibliográfico prévio fornece informações sobre ambientes geotectônicos que serão abordados e os tipos possíveis e/ou já descritos de mineralizações na área objeto de estudo, além de ter indicado o nível de conhecimento da região.

Na etapa de campo, espera-se que a descrição e caracterização dos recursos minerais ocorra de forma integrada ao mapeamento geológico (vide IT-02 DIGEOB): as

ocorrências conhecidas devem ser visitadas quantas vezes se fizerem necessárias e quaisquer outros indícios de mineralizações devem ser registrados e estudados.

A fase analítica contribui para detalhamento de composição, texturas e estruturas dos minerais de minério, determinação da idade de formação das rochas e da mineralização, da idade de metamorfismo e deformação, além de estimar parâmetros físico-químicos (P-T-x) dos fluidos mineralizantes que auxiliam na proposta de modelos genéticos.

A) Etapa preparatória

Consiste na primeira fase, e deve estar alinhada com a fase correspondente do Mapeamento Geológico (vide IT-01 e IT-02 DIGEOB). Caso a região alvo de estudo não possua base de cartografia e mapeamento geológico sistemático prévio, executado pelo SGB, sugere-se promover ação conjunta com DEGEO. Para estudos direcionados para recursos minerais metálicos vale ressaltar as seguintes ações no cronograma de atividades:

- 1) levantamento de pontos (afloramentos e de ocorrências minerais) conhecidos no GeoSGB e na literatura;
- 2) consistência locacional das ocorrências minerais com base em imagens satelitais e alimentação dos atributos de cada ponto com base em trabalhos anteriores;
- 3) revisão conceitual e empírica para as mineralizações já conhecidas;
- 4) planejamento das atividades de campo.

B) Caracterização dos recursos minerais em campo

Em afloramentos contendo mineralizações, os recursos minerais e suas encaixantes devem ser descritas detalhadamente em termos dos aspectos geológicos, dimensões, toponímia e localização. Quando possível, devem ser coletados dados estruturais (estruturas planares, lineares, direções de alinhamentos, etc.) e realizadas amostragens representativas de rochas e outros materiais (fragmentos de canal *-ship*, sedimento, solo) para análise laboratorial, referenciadas espacialmente quando necessário (amostras orientadas para estudos microtectônicos, por exemplo). Aspectos relevantes devem ser esboçados em croquis e sempre fotografados (IT-03 DIGEOB).

A caracterização dos recursos minerais em campo tem como objetivos específicos a definição da geometria e a dimensão dos corpos mineralizados, as diferentes fácies do minério e as relações entre as zonas mineralizadas e as rochas hospedeiras. Para tal, deve-se observar em cada afloramento uma série de elementos:

- Forma de ocorrência / estilos (disseminado, filoniano, *stratabound*, etc);
- Geometria dos corpos mineralizados (tabular, lenticular, anastomosado, etc) e o arranjo espacial entre estes (concordante ou não);
- Relação geológica entre os corpos mineralizados e as encaixantes (tipos de contato, relações estratigráficas, proporção minério – encaixante, presença ou ausência de halos ou zoneamento de alteração, etc);
- Mineralogia macroscópica do minério, dos halos de alteração hidrotermal e das encaixantes;
- Características físicas como cor, densidade, granulometria, texturas (forma e arranjo dos grãos), estruturas primárias (ígneas, sedimentares) e/ou secundárias (diagenéticas, tectônicas, supergênicas).

Uma informação importante, de grande valia é atribuir o grau de importância do recurso mineral para fins de melhor descrição e preenchimento do banco de dados. Para dirimir quaisquer dúvidas, seguem os conceitos:

Indício: presença ou concentração de um ou mais minerais, ou substâncias (em ambiente geológico favorável) ainda não avaliadas, mas com possibilidade de indicar a presença ou localização de um depósito desse mineral/dessa substância. Pode ser mineralógico ou geoquímico (eventualmente geofísico). Importante: o indício não deve ser alimentado na base de dados de Recursos Minerais, ficando restrito ao relatório do projeto.

Ocorrência: concentração de elemento (substância), mineral ou rocha de interesse econômico, científico e técnico. Já foram definidas algumas características, como minerais de minério e ganga, teor, rocha hospedeira e/ou encaixante, estrutura hospedeira, morfologia e alguma indicação aparente da extensão; não é caracterizada como economicamente aproveitável, ou que por insuficiência de parâmetros técnicos e econômicos não pode ser definida como potencialmente econômica.

Depósito: concentração natural de um ou mais minerais ou substâncias ou rochas, com tamanho/volume e concentração/teor suficientes para que, sob circunstâncias favoráveis, possua potencial para exploração (aproveitamento). Já possui parâmetros geológicos bem conhecidos e avaliação em termos de recursos ou reservas.

C) Etapa analítica

Um grande número de métodos laboratoriais pode ser utilizado para complementar e expandir a caracterização iniciada em campo. Os objetivos específicos são determinar as composições, os processos mineralizadores e, quando possível estabelecer modelos evolutivos para depósitos (*Mineral Systems*). O conceito de sistema mineral foi introduzido formalmente por Wyborn *et al.* (1994) e envolvem:

- (1) eventos tectônicos que desencadeiam e definem janelas temporais para eventos de mineralização;
- (2) processos geoquímicos que produzem "regiões de origem" frequentemente enriquecidas em metais e fluidos hidrotermais e magmas capazes de mobilizar esses metais;
- (3) processos tectônicos, sedimentares, diagenéticos e estruturais que produzem condutos que podem atuar como caminhos para o fluxo de fluido/magma nas escalas litosférica, crustal, provincial e distrital;
- (4) processos que impulsionam o fluxo de fluido;
- (5) mecanismo focal que concentra (ou estrangula) o fluxo de fluidos ou magmas em locais de 'armadilhas' permitindo deposição da mineralização;
- (6) processos químicos e físicos que induzem deposição de metal em armadilhas;
- (7) processos geoquímicos pós-deposicionais gerador de características geoquímicas e geofísicas que permitem a sua posterior detecção;
- (8) processos que aumentam a exumação, preservação do corpo mineralizado

Os métodos laboratoriais mais usuais a serem utilizados são:

Descrição petrográfica de lâminas delgadas polidas em microscópio óptico, incluindo análise microtectônica: uma boa descrição leva à identificação da paragênese

mineral (minerais translúcidos e opacos), da ordem de cristalização, de indicadores cinemáticos, entre outros aspectos microscópicos.

É importante que sejam **sempre** confeccionadas lâminas polidas (sem lamínula), além de essencial para a descrição de minerais opacos, as fotomicrografias se mostram de melhor qualidade (e algumas propriedades mineralógicas mais visíveis), e também as lâminas se tornam aptas para uso em outras fases analíticas caso haja necessidade (p.ex. MEV, Microsonda eletrônica).

Grande parte das Unidades Regionais do SGB está equipada com microscópios petrográficos que permitem uma excelente petrografia de minerais transparentes e opacos, e respectiva captura de imagens de lâminas polidas, e proporcionam condições para classificação das rochas. Para trabalhos com grãos minerais (por exemplo: diamante, ouro, zircão, dentre outros) e até pequenas amostras de mão, para descrições de morfologia, textura e estruturas pode-se contar com lupas binoculares (estereomicroscópios) que, com dispositivo de captura de imagens e respectivo programa produzem fotografias em 3D.

Análises em microscópio eletrônico (MEV): O MEV é um dos mais versáteis instrumentos disponíveis para a observação e análise das características microestruturais e morfológicas de materiais sólidos. Torna-se uma ferramenta valiosa na observação e investigação de minerais de minério ou outro que seja de relevante interesse, texturas, intercrescimento e zonação de minerais. O Serviço Geológico do Brasil dispõe de dois laboratórios equipados com este equipamento (Figura 1). Para sua utilização é necessária somente metalização de carbono da lâmina polida, mesma usada na petrografia (metalização feita também neste mesmo laboratório). Para estas análises necessita obedecer aos protocolos e agendamentos gerenciados pela DIGEOD.

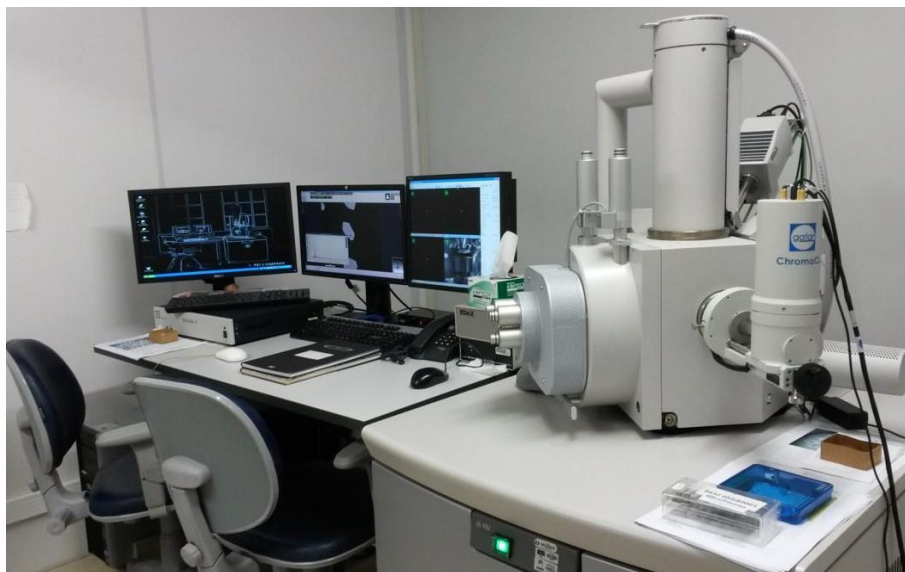


Figura 1. Laboratório de MEV disponível para uso pelos pesquisadores do SGB em Brasília.

Assim, as vantagens do uso do MEV são a possibilidade de grande ampliação final da imagem (de até 300.000 vezes), geração de imagens com altas resolução linear e profundidade de campo, entretanto, adicionalmente pode-se realizar análises de Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS).

Apesar da técnica EDS ser uma análise de espectroscopia, ela é usualmente apresentada juntamente com a microscopia eletrônica de varredura pela sua disponibilidade nestes equipamentos, permitindo a obtenção de informações químicas em áreas da ordem de micrômetros. As informações, qualitativas e quantitativas, sobre os elementos presentes são obtidas pela captação dos raios-X característicos resultantes da interação do feixe primário com a amostra.

O resultado das análises de EDS é a determinação das porcentagens dos elementos por microanálise de raios-X no microscópio eletrônico, neste caso, a análise é denominada semiquantitativa. O princípio consiste em avaliar a superfície dos picos que é proporcional à quantidade de átomos que produziu quando feixe incide na amostra.

Observação por catodoluminescência é uma ferramenta também disponível associada ao MEV, isso por que alguns materiais naturais emitem luz no espectro visível quando são bombardeados com um feixe de elétrons (emitidos pelo MEV). A catodoluminescência tem sido usada em microscopia eletrônica em diversos estudos de

minerais, especialmente nos portadores de elementos terras raras, que podem ser detectados na ordem de partes por milhão.

Litogeoquímica (ICP, absorção atômica, etc): deve ser realizada nas rochas mineralizadas e hospedeiras e nos halos e zonas de alteração de alteração, para determinar a composição dos tipos e a distribuição dos elementos mineralizantes. Para melhor escolha do pacote de análises disponível na empresa, consultar equipe da DIGEOQ.

Química mineral (microsonda eletrônica): permite definir a composição química de cada cristal em uma lâmina polida metalizada (metalização em carbono), que pode servir, entre outras aplicações, para a determinação das condições de P e T de formação de uma paragênese mineral conhecida, a partir de cálculos de geotermobarometria.

Estas análises são possíveis de se realizar por meio de convênio/contrato com algumas universidades públicas que dispõem deste equipamento. No SGB estas análises obedecem aos protocolos e agendamento com a DIGEOD.

Inclusões fluidas: O estudo de inclusões fluidas tem provado particular utilidade no campo de gênese de minérios, com valorosa contribuição para o atual entendimento no transporte e deposição de minérios. Permite a identificação da composição de fluidos mineralizantes e a determinação de condições de P e T de cristalização dos minerais hospedeiros.

A seleção de qual rocha/mineral deve ser realizada o estudo de inclusões fluidas depende do objetivo da pesquisa e mais ainda se há inclusões fluidas nas rochas em questão. Durante a petrografia convencional, inclusões fluidas já podem ser detectadas, se tornando assim uma amostra potencial para este estudo.

A observação de inclusões fluidas é realizada em microscópio petrográfico de luz transmitida comum, em lâminas bipolidas ou até em fragmentos das bipolidas já descoladas do vidro. Alguns laboratórios de laminação da CPRM estão aptos a confeccionar este tipo de lâmina. Lâminas bipolidas para estudo de inclusões fluidas são feitas usando *entelan* para ocorrer descolamento posterior.

Na CPRM, as Superintendências Regionais de São Paulo, Belém e Brasília (Figura 2) estão equipadas com as platinas de aquecimento e resfriamento, essenciais para

desenvolver pesquisas nesta área, e vêm desenvolvendo trabalhos nessa linha com apoio e treinamento da Divisão de Geologia Econômica (DIGECO).

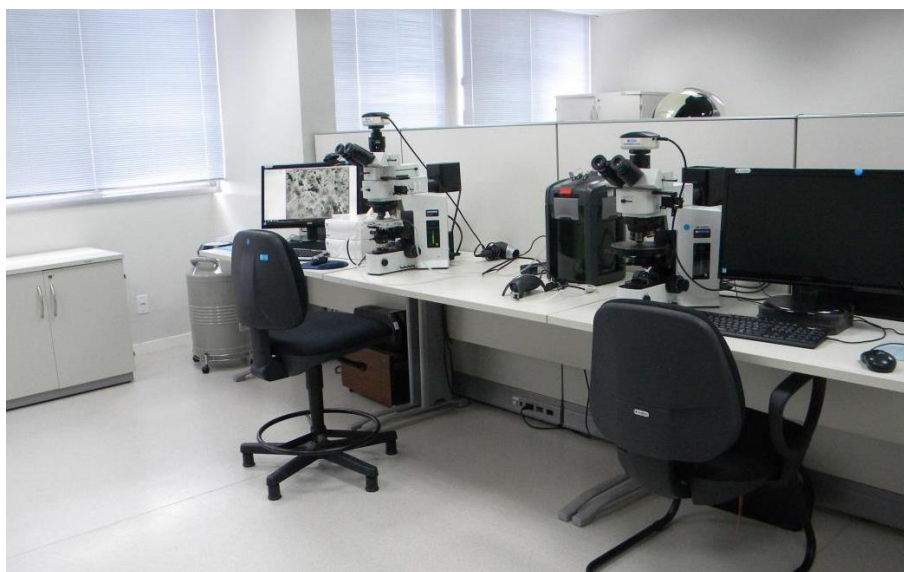


Figura 2. Laboratório de inclusões fluidas da CPRM em Brasília.

Inclusões fluidas são facilmente e preferencialmente estudadas em minerais transparentes, cujo quartzo é o mais comum. Entretanto, inclusões fluidas em minerais opacos também podem ser estudadas, mas com uma óptica diferenciada.

Inclusões fluidas em minerais opacos é uma metodologia recente que algumas instituições de pesquisa nacionais e internacionais têm obtido sucesso aplicado a estudo de óxidos, e mais raramente em sulfetos. Na CPRM, no Laboratório de Brasília conta-se com uma platina de aquecimento e resfriamento acoplado a um microscópio petrográfico com iluminação infravermelha, que possibilita a observação em minerais opacos. O tipo de lâmina e metodologia são os mesmos para estudos em minerais transparentes.

Após o estudo petrográfico, e os campos que possuem as IFs terem sido previamente selecionadas para estudo microtermométrico, as lâminas são quebradas ao redor dos campos estudados, com a ajuda de uma caneta de ponta de diamante. A análise microtermométrica consiste de observação cautelosa das mudanças de fase durante os processos de aquecimento e resfriamento.

Dependendo da composição do fluido, podem estar envolvidas nestes processos transformações de fases. Conhecendo as temperaturas em que as transformações

ocorrem, é possível estimar as condições de PVTX (pressão, temperatura, composição) do fluido no momento de seu aprisionamento.

Microespectrometria Raman: é uma técnica que permite a identificação da estrutura química do material analisado. As informações obtidas são extraídas a partir do espalhamento sofrido pela radiação eletromagnética após a interação da mesma com o material, que pode ser na forma sólida, líquida ou gasosa. Portanto, é comumente usada também em inclusões fluidas podendo obter a composição de uma única inclusão. Esta técnica é aplicada diretamente sobre a amostra em questão, não sendo necessário fazer uma preparação especial no material. Além do mais, não há alteração na superfície que se faz a análise.

Estudo dos isótopos estáveis (C, H, O, S): auxiliam na determinação da composição e da origem de fluidos mineralizantes, da temperatura de precipitação do minério e das fases minerais de alteração. Existe um Programa Especial Analítico detalhado na IT-01 DIGEOD destinado a estudos de mineralizações e questões mais complexas.

Até o momento o Serviço Geológico do Brasil/CPRM não dispõe de equipamentos/laboratórios para análises isotópicas, assim, dependemos da contratação de laboratórios externos. A dependência da contratação implica que a lista de análises disponíveis pode variar ao longo do tempo. A Divisão de Geodinâmica (DIGEOD) é responsável pela gestão e apoio destas análises.

Estudo de isótopos radiogênicos: importante ferramenta utilizada para estimativa de idade das rochas, investigar potenciais fontes de fluidos e metais e para auxiliar no entendimento de processos geológicos. Para facilitar a escolha em situações diversas, a Figura 3 apresenta um resumo das aplicações de cada método disponível.

Para a seleção do método geocronológico é necessária a descrição petrográfica e, se possível, análise litoquímica da rocha, para avaliação do método mais adequado (Tabela 1). Assim como as análises de isótopos estáveis, o Serviço Geológico do Brasil/CPRM não dispõe de equipamentos/laboratórios, havendo então a dependência da contratação.

Tabela 1. Listagem dos métodos radiogênicos mais comuns, materiais utilizados e aplicações.

Método*	Materiais comumente datados	Aplicações
---------	-----------------------------	------------

Ar-Ar	Feldspatos, biotita, sericita, argilas, muscovita, flogopita, glauconita, anfibólios, rocha total, etc	Excelente para determinar histórias de evolução termal, em especial em ambientes metamórficos
Rb-Sr	Rocha total, feldspato potássico, apatita e carbonatos	O método caiu em desuso por sua imprecisão, porém pode ser usado em conjunto com outros métodos para a determinação mais apurada de ambientes petrogenéticos
Sm-Nd	Rocha total, granada, feldspato, piroxênio, apatita, scheelita, cassiterita, fluorita	Obtenção de idades modelo de magmas-pai, estudos de evolução petrogenética, idades de cristalização
Re-Os	Sulfetos (molibdenita e galena mais comuns), rocha total (máficas, ultramáficas)	Muito útil para o estudo de depósitos minerais e de evolução metalogenética
U-Pb	Zircão, monazita, rutilo, titanita, perovskita, badeleíta, xenotima, carbonato, e outros minerais ricos em U e pobres em Pb	O melhor método para datação de protólitos ou de eventos de cristalização, além de eventos hidrotermais

***Para maiores detalhes consultar a IT-01 DIGEOD**

Estudos de espectroscopia de reflectância (ER): tem sido cada vez mais aplicada na pesquisa mineral para a determinação de minerais de minério e/ou minerais de alteração associados, seja em amostras de rocha ou em produtos de sensoriamento remoto (imagens hiperespectrais), portanto um método para rápida resposta sem a necessidade de confecção de lâminas. A ER resume-se ao estudo da energia eletromagnética refletida pelo material em função do seu comprimento de onda, sendo essa informação utilizada para gerar informações sobre a estrutura química e atômica de vários componentes orgânicos e inorgânicos (Ramakrishnan *et al.*, 2013).

A Superintendência Regional de São Paulo possui um laboratório de Espectroscopia Mineral que é equipado com um espectrorradiômetro ASD-FieldSpec 3 Hi-Resolution (Figura 3), com 2.151 bandas espectrais distribuídas nos comprimentos de onda do visível-infravermelho próximo (VNIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) (entre 350 e 2.500 nm), e resolução espectral de 3 a 8,5 nm. A aquisição e o tratamento de imagens de satélite, equipadas com sensores hiperespectrais, é realizada pela equipe da DISEGE e pode ser solicitada para estudo em uma determinada área.



Figura 3. Espectrorradiômetro ASD-FieldSpec 3 Hi-Resolution, no Laboratório de Espectroscopia Mineral na SUREG-SP (retirado de Guerra, 2019).

Para facilitar o entendimento segue abaixo fluxograma esquemático de ações que a Divisão de Geologia Econômica (DIGECO) desenvolve e coordena em conjunto com outras divisões do Serviço Geológico.

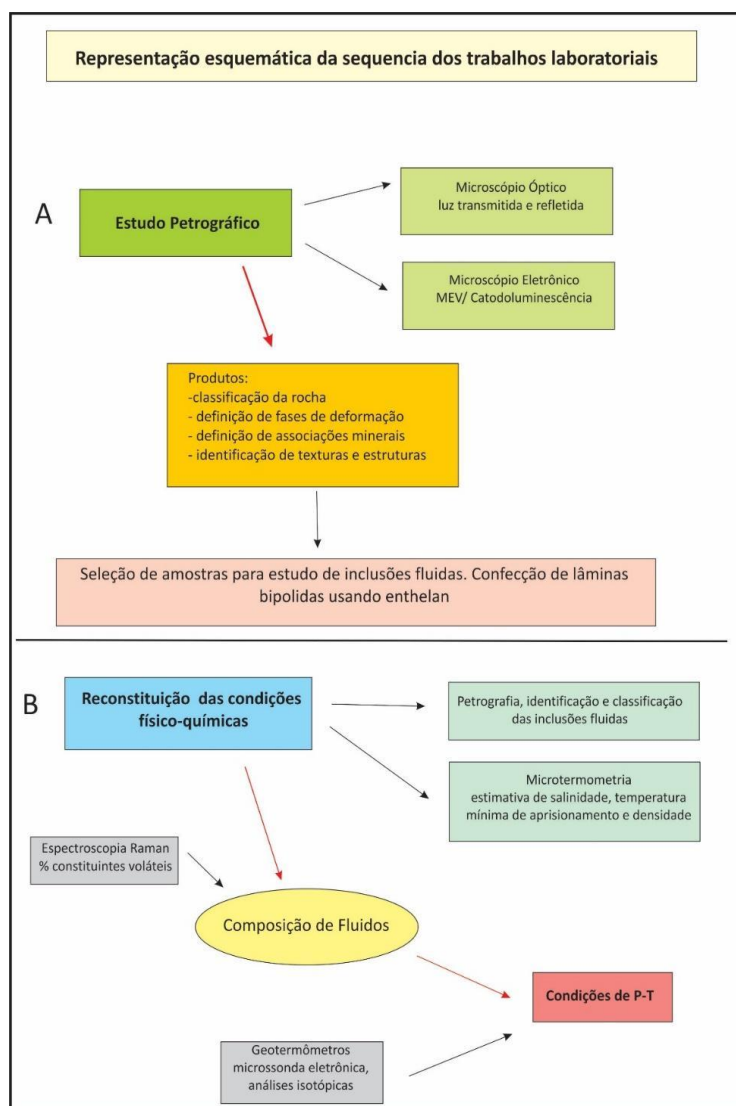


Figura 4. Fluxograma de atividades laboratoriais e analíticas.

Referências

- Guerra G.I.T.2019. Caracterização de gossans, lateritos e rochas metassedimentares oxidadas da região de Nova Brasilândia D’Oeste (RO) através de espectroscopia de reflectância e difração de raio-X. Dissertação de mestrado. USP. São Paulo. 77p.
- Ramakrishnam, D., Nithya, M., Singh, K. D., Rishikesh, B., 2013. A field technique for rapid lithological discrimination and ore mineral identification: results from Mamandur Polymetal Deposit, India: Journal of Earth System Science, v. 122, nº. 1, p. 93-106.
- Wyborn, L.A.I., Heinrich, C.A. and Jaques, A.L. (1994) Australian Proterozoic Mineral Systems: Essential Ingredients and Mappable Criteria. Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference, Melbourne, 109-115.