

# Sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil

**Alvaro Penteado Crósta**

Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas

**Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida**

Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

**Waldir Renato Paradella**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

**Sebastião Milton Pinheiro da Silva**

Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes,  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

**Paulo Roberto Meneses**

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

## RESUMO

É avaliado o estado atual da tecnologia de sensoriamento remoto para aplicações em exploração mineral, incluindo os principais instrumentos disponíveis e suas características, seguida de uma análise do cenário brasileiro no tocante às instituições de ensino e pesquisa e do setor industrial atuantes nessa área, assim como seus potenciais e limitações. São apresentados alguns estudos de caso envolvendo aplicações do sensoriamento remoto em atividades de exploração e exploração mineral desenvolvidas no Brasil e empregando diferentes técnicas e em distintas condições geológicas, fisiográficas e climáticas. Ao final, são apresentadas as perspectivas futuras quanto ao uso do sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil.

**Palavras-chave** Sensoriamento remoto. Exploração mineral. Radiação eletromagnética. Geologia espectral. Geologia espectral. Interferometria diferencial. Geobotânica.

## INTRODUÇÃO

Desde o surgimento das fotografias aéreas verticais na primeira metade do século 20, o sensoriamento remoto (SR) tem sido uma das técnicas mais utilizadas na busca de acumulações econômicas de recursos minerais, a chamada exploração mineral. Com a notável evolução das tecnologias de aquisição de dados de SR, principalmente nas últimas três décadas, pode-se dispor nos dias atuais de uma variada gama de imagens coletadas por sensores remotos. Esse conjunto de dados de SR vem sendo coletado tanto a partir de plataformas orbitais (satélites), como também de aeronaves dos mais diversos tipos, e vem contribuindo de modo significativo para o sucesso das atividades de exploração mineral.

Nos dias atuais, dados os significativos avanços tecnológicos alcançados, o SR pode ser utilizado não apenas como fonte de informações indiretas na indicação de áreas potenciais para ocorrências dos mais diversos tipos de mineralizações, mas também de informações diretas sobre a composição mineralógica de solos e rochas e/ou de estruturas geológicas associadas a depósitos minerais. Além disso, o SR, a depender do nível de exposição das rochas na área sob análise, pode contribuir diretamente para a compreensão da gênese de jazidas minerais. Finalmente, ele pode também ser utilizado como instrumento de precisão em atividades de monitoramento relacionadas à exploração de jazidas minerais.

Para ser plenamente eficaz enquanto técnica exploratória, o SR deve idealmente ser utilizado em combinação com os levantamentos geológicos de campo, estes sempre indispensáveis, assim como com outras

técnicas exploratórias, tais como os métodos geofísicos e geoquímicos. Ele também pode ser combinado com uma técnica complementar de grande relevância, que é a espectroscopia de reflectância (THOMPSON et al., 1999; BEDELL et al., 2009), por meio da qual é possível estabelecer a composição mineralógica de amostras de rocha de maneira rápida, eficiente e não-destrutiva.

Neste capítulo, são abordados os avanços recentes mais significativos do ponto de vistas das técnicas de SR utilizadas nos dias atuais para exploração mineral, bem como apresentados alguns estudos de caso no Brasil, ilustrando sua aplicação em atividades de exploração e de exploração de recursos minerais de distintos tipos e em diferentes condições fisiográficas e climáticas. O objetivo é mostrar a enorme versatilidade alcançada pelas técnicas de SR, no sentido de orientar estratégias de aplicação das mesmas no desenvolvimento da produção mineral brasileira.

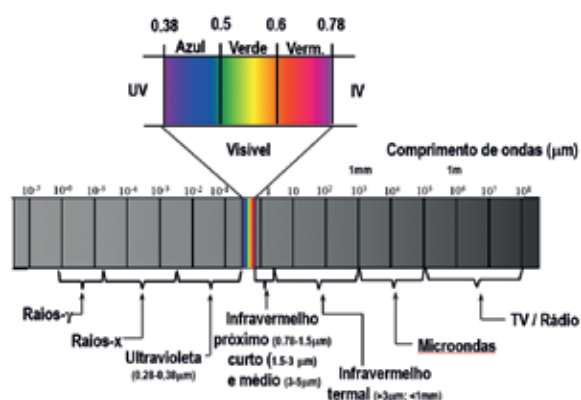
## A EVOLUÇÃO DO SENSORIAMENTO REMOTO: UM BREVE RETROSPECTO

Do ponto de vista da sua utilização em atividades de exploração mineral, a evolução das técnicas de aquisição de dados utilizadas pelo SR pode ser analisada pelas óticas do incremento progressivo da resolução espacial e espectral. Para uma melhor compreensão desses dois conceitos, pode-se recorrer ao exemplo das fotografias aéreas convencionais, precursoras do SR moderno, que fazem uso de filme fotográfico em geral monocromático (preto-e-branco). Essas fotografias possuem uma grande capacidade de discriminar os objetos de pequenas dimensões, ou seja, têm alta

resolução espacial, mas uma capacidade extremamente limitada de registrar sua interação com a radiação solar, traduzida apenas pela intensidade de energia refletida na região espectral do visível e representada em tons de cinza. Neste caso, nem mesmo as cores dos objetos são registradas, o que confere às fotografias aéreas uma baixa resolução espectral.

Os sensores remotos, tanto aéreos como orbitais, experimentaram notável evolução em ambos os aspectos. No tocante à resolução espacial, sensores orbitais atingem nos dias atuais resolução máxima de cerca de 30 cm, superior em muitos casos à resolução espacial das fotografias aéreas utilizadas nas décadas de 1970 e 1980.

Mas talvez o maior salto tecnológico experimentado no SR tenha sido o da evolução da resolução espectral. A Figura 1 mostra o espectro eletromagnético (EEM) com suas subdivisões tradicionais: as regiões do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curtas (SWIR), infravermelho termal (TIR) e microondas. As regiões de menor comprimento de onda, os raios- $\gamma$ , raios-x e ultravioleta, não podem ser utilizadas no SR da superfície da Terra, devido ao bloqueio da energia nesses comprimentos de onda pela atmosfera. Os maiores comprimentos de onda, relativos às ondas de rádio/TV, são utilizadas apenas para a comunicação entre as plataformas de coleta de dados de SR e as estações terrestres.



**Figura 1** Representação do espectro eletromagnético com as principais regiões utilizadas em SR geológico, em termos de comprimento de onda (em micrometros –  $\mu\text{m}$ ) (Fonte: Elaborada por Alvaro Penteado Crósta).

Em termos tecnológicos, os primeiros sensores remotos captavam a energia solar refletida pela superfície da Terra em apenas uma única faixa da região do visível do EEM. Esse é o caso, por exemplo, das primeiras câmeras aerofotogramétricas, utilizando ainda os filmes em preto-e-branco. Posteriormente, esses filmes evoluíram para o registro colorido, ainda na região do visível. A etapa seguinte foi a introdução dos filmes sensíveis à radiação infravermelha, estendendo assim a possibilidade de registro de informações da superfície para além da região do visível do EEM, ainda que de forma limitada apenas ao infravermelho próximo.

A partir da década de 1960, a introdução de dispositivos imageadores eletrônicos, utilizando tecnologias de diodos semicondutores, ampliou significativamente a possibilidade de captação de energia para outras regiões do EEM. Isso permitiu o desenvolvimento de novos sensores operando em regiões não apenas do espectro infravermelho não-termal que, juntamente com a região visível, registram a energia solar refletida pelos materiais terrestres, mas também do infravermelho termal, que registram a energia térmica emitida pelos materiais terrestres.

Essa evolução teve um enorme impacto positivo na identificação direta de minerais e rochas e de diversos outros processos que ocorrem na superfície terrestre. Por meio dela, os sensores passaram a operar como instrumentos analíticos, capazes de fornecer informações de grande valor sobre a composição química-molecular dos materiais terrestres, em particular dos minerais e rochas. Além disso, a operação a partir de plataformas orbitais ou aéreas possibilita que os sensores façam esse tipo de análise à distância e cubram grandes áreas da superfície da Terra, fatores que favorecem sobremaneira o seu uso em geologia exploratória, sobretudo em países extensos e com regiões de difícil acesso.

Em uma evolução tecnológica paralela, iniciou-se em meados da década de 1930 o desenvolvimento de sistemas sensores com radares, seguidos na década de 1950 pela introdução da tecnologia de radares de abertura sintética (SAR), em uso até os dias atuais. Os sensores do tipo SAR operam na região das microondas do EEM, que têm comprimento de onda mais longo em relação aos sensores baseados em diodos semicondutores. Dentre as características típicas dos sensores SAR está a possibilidade de obtenção de imagens independentemente de uma fonte externa de energia, uma vez que eles produzem a sua própria energia. Esta é enviada até a superfície na forma de pulsos eletromagnéticos e, após a interação com a superfície, uma parte é retroespalhada e retorna ao sensor, sendo então utilizada para gerar as imagens SAR. Isto per-

mite que os radares imageadores obtenham imagens tanto diurnas como noturnas. Outra característica de grande importância dos sensores SAR é a capacidade de penetração das ondas eletromagnéticas de maior comprimento de onda em nuvens e até na vegetação e nas camadas mais superficiais do solo, algo que não é possível a partir dos sensores imageadores baseados em diodos semicondutores. Tais características conferem aos radares grande flexibilidade de operação em regiões tropicais úmidas, onde a presença de nuvens e de cobertura vegetal é comum.

Do ponto de vista da natureza dos fenômenos registrados nas imagens coletadas por sensores desses dois tipos (diodos semicondutores e SAR), há também uma distinção de grande importância. Enquanto os primeiros registram fenômenos de natureza química-molecular dos materiais presentes na superfície imageada, os sensores SAR registram fenômenos de natureza física, tais como a macro e micro-rugosidade das superfícies, sua estrutura física (tamanho, orientação e distribuição dos elementos físicos presentes na superfície), bem como suas características de condutividade elétrica.

Desse modo, existe uma notável complementaridade entre os fenômenos registrados por esses dois tipos de sensores. Isto leva à conclusão de que a operação conjunta de sensores operando nas regiões do EEM relativas ao visível, infravermelho refletido e infravermelho emitido (termal), combinada com radares operando na região das microondas (SAR), permite a obtenção de um extenso e importante conjunto de informações químico-físicas sobre os fenômenos e materiais presentes na superfície terrestre, dentre os quais as rochas e os minerais de forma direta ou, indiretamente, pela geobotânica, que se utiliza da influência da geologia sobre as coberturas vegetais naturais.

## PRINCIPAIS SENSORES PARA USO NA EXPLORAÇÃO MINERAL

Nesta seção é feita uma síntese das principais tecnologias de SR disponíveis para uso na exploração mineral a partir de plataformas orbitais (satélites) e aéreas (aeronaves). Em vista da grande variedade de tecnologias e sensores atualmente disponíveis, foram selecionados apenas aqueles que têm um uso mais voltado para as atividades de exploração e também de exploração mineral. Além disso, os dois tipos de sensores imageadores abordados na seção anterior (diodos semicondutores e SAR) serão tratados em separado, ainda que sua utilização conjunta represen-

te uma situação ideal em vários tipos de aplicações geológicas do SR, conforme mencionado.

### Sensores remotos orbitais

Os sensores orbitais que utilizam diodos semicondutores e que têm maior potencial de aplicação em estudos geológicos são os dos satélites da série Landsat, o Terra/ASTER e, mais recentemente, o WorldView-3, todos eles operando nas regiões do EEM referentes ao visível e infravermelho refletido e os dois primeiros também no infravermelho termal.

Já os sensores do tipo SAR operando a bordo de satélites e que têm sido mais extensivamente utilizados em estudos geológicos exploratórios são o Radarsat, o ALOS/PALSAR e o TerraSAR-X.

Uma síntese das principais características desses sensores é apresentada a seguir, com foco em aplicações geológicas e, mais especificamente, na exploração mineral.

### Landsat TM/ETM+/OLI

Os satélites Landsat são parte do programa homônimo da NASA (*National Aeronautics & Space Administration*, dos Estados Unidos), iniciado em 1972, sendo o programa mais antigo de SR orbital de recursos naturais. Ao longo dos anos os sensores dos satélites Landsat foram passando por aperfeiçoamentos no sentido de conferir-lhes maior capacidade de discriminação espacial e espectral dos materiais da superfície terrestre. De particular importância para as aplicações geológicas são os sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e o *Operational Land Imager* (OLI), operando a bordo, respectivamente, dos satélites Landsat-4 e 5, Landsat-7 e Landsat-8.

O sensor TM, que iniciou operações em 1982, foi o primeiro a contar com bandas espectrais na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR), na qual um grande número de minerais possui feições de absorção espectral características. De fato, a inclusão de uma segunda banda no SWIR nesse sensor foi uma demanda de um grupo de pesquisadores do *United States Geological Survey* (USGS), pioneiros no desenvolvimento das aplicações do SR na exploração mineral (PODWYSOCKI et al., 1983), com o objetivo específico de mapear minerais portadores do íon hidroxila ( $\text{O-H}^-$ ), comuns em ambientes de alteração hidrotermal.

Com uma resolução espacial de 30 m e sete bandas espectrais distribuídas nas regiões do EEM do visível (3 bandas), infravermelho próximo (1 banda), infravermelho de ondas curtas (2 bandas) e infravermelho termal (1 banda), o sensor TM, juntamente com o seu sucessor, o ETM+, vêm sendo extensivamente utiliza-

dos em projetos de exploração mineral em todo o mundo, com grande êxito (CRÓSTA; SOUZA FILHO, 2009). Isso se deve à sua notável capacidade de identificar e mapear, em escala regional, minerais de interesse na localização de áreas potenciais para vários tipos de mineralização. Dentre elas encontram-se os óxidos e hidróxidos de  $\text{Fe}^{3+}$  (hematita, goethita e limonita), argilas (caolinita, dickita, montmorilonita), micas (ilita, sericita, muscovita), sulfatos (jarosita, alunita) e carbonatos (calcita e dolomita). Contudo, devido à resolução espectral relativamente reduzida desses dois sensores, o seu uso é restrito à diferenciação de dois tipos básicos de assembleias minerais: óxidos/hidróxidos de  $\text{Fe}^{3+}$  e o conjunto de argilas/micas/sulfatos/carbonatos, geralmente denominado de forma genérica de “argilas”.

Apesar dessa limitação, o notável sucesso que o uso do Landsat TM alcançou junto à comunidade geológica mundial tem estreita relação com a combinação dessa configuração espectral bastante flexível e abrangendo todas as regiões da radiação refletida do EEM com outras características tais como: resolução espacial adequada, cobertura mundial e acesso fácil aos dados. Em 1999 o TM foi substituído pelo seu sucessor, o ETM+, operando a partir do satélite Landsat-7, que manteve basicamente as mesmas características técnicas, apenas acrescentando uma banda espectral pancromática, cobrindo a região do visível e parte do infravermelho próximo, mas com uma resolução espacial melhorada (15 m), e com melhor resolução espacial na banda termal (60 m contra os 120 m dos antecessores). Esse acréscimo, em termos das aplicações geológicas, possibilitou uma melhoria na caracterização da textura superficial dos terrenos, o que favorece as interpretações de estruturas geológicas em imagens.

Em 2013, com o lançamento do Landsat-8, entrou em operação a nova versão da série TM/ETM+, que passou a contar com a combinação de dois sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). No sensor OLI, em relação às versões anteriores, foram acrescentadas duas novas bandas espectrais, sendo uma delas situada em comprimento de onda logo abaixo da região correspondente ao comprimento de onda do azul no espectro visível, direcionada para estudos oceânicos e atmosféricos, e a outra no espectro do infravermelho de ondas curtas, para estudos atmosféricos. Portanto, do ponto de vista das aplicações geológicas em geral, e na exploração mineral em particular, o OLI apresenta basicamente a mesma configuração do ETM+, mantendo assim suas características de diferenciação entre áreas com alta concentração de óxidos/hidróxidos de ferro e filossil-

catos. Já o sensor TIRS, que atua em combinação com o OLI, dispõe de duas bandas espectrais com 90 m de resolução espacial onde os sensores TM e ETM+ tinham apenas uma. Além de maior eficiência na detecção da temperatura superficial este sensor pode ainda ser usado na detecção de processos de silicificação.

A literatura registra inúmeros exemplos de aplicações exitosas das imagens do Landsat em projetos de exploração mineral e uma síntese de algumas dessas aplicações encontra-se em Loughlin (1991), Sabine (1999) e Crósta e Souza Filho (2009). No Brasil, onde a geralmente bem desenvolvida cobertura de solos, produto de intemperismo típico de zonas tropicais/sub-tropicais, aliada à presença frequente de cobertura vegetal, dificultam ou até mesmo impossibilitam o estudo direto da resposta espectral dos minerais e rochas a partir de imagens do Landsat TM/ETM+, a obtenção indireta de informações do substrato geológico utilizando a resposta espectral da vegetação pode ser uma alternativa adequada. Essa via, utilizando a geobotânica, foi explorada em projetos de exploração mineral para depósitos auríferos desenvolvidos na região do Tapajós, na Amazônia, por Almeida et al. (2009).

Todo o acervo de imagens do Programa Landsat, que inclui as imagens adquiridas pelos vários sensores que operaram a bordos dos satélites da série entre 1973 e os dias atuais, assim como todas as novas imagens adquiridas pelo Landsat-8/OLI, foram disponibilizadas de maneira aberta a partir de 09/01/2009, sem custo, e podem ser obtidas junto ao USGS por meio dos aplicativos on-line *EarthExplorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>) e *Glovis* (<http://glovis.usgs.gov/>).

### Terra/ASTER

O satélite Terra, lançado em 1999, inaugurou um novo e promissor período para o SR geológico, graças ao sensor multiespectral *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER). Este sensor, desenvolvido em conjunto pelas agências espaciais dos Estados Unidos e do Japão, foi o primeiro a ser desenvolvido com foco específico em aplicações geológicas, com notável destaque para as atividades de exploração mineral (ABRAMS, 2000).

A configuração espectral do ASTER, notavelmente superior aos sensores da série Landsat, incluiu 14 bandas espectrais, distribuídas entre as regiões do visível e infravermelho próximo (VNIR - 3 bandas), infravermelho de ondas curtas (SWIR - 6 bandas) e infravermelho termal (TIR - 5 bandas). Cada um desses conjuntos de bandas contou com resolução espacial específica, variando de 15 m no VNIR, 30 m no SWIR e 90 m no TIR. Além disso, uma das bandas



do visível (banda 3) foi duplicada e configurada com uma visada fora do nadir e em direção contrária à do deslocamento do satélite, de modo a proporcionar uma diferença de paralaxe e, consequentemente, permitir a obtenção de imagens estereoscópicas e modelos digitais de superfície.

Algumas das bandas espectrais do ASTER, em particular as bandas do SWIR, foram projetadas especificamente para cobrir intervalos de comprimento de onda estratégicos para a identificação de feições espectrais relacionadas a minerais de alteração hidrotermal que, por sua vez, se associam a concentrações de minerais metálicos, notadamente ouro e cobre (CRÓSTA et al., 2003; ROWAN et al., 2003; YAMAGUCHI; NAITO, 2003; CARRINO et al., 2014). Dentre os vários minerais que podem ser identificados utilizando essa capacidade do ASTER estão a hematita/goethita, caolinita, ilita, alunita, pirofilita, calcita, dolomita e quartzo.

O ASTER não teve continuidade e começou a apresentar falhas na aquisição de imagens, principalmente nas bandas do SWIR, a partir de abril de 2007. Contudo, todo o acervo de imagens coletadas durante os oito anos em que o sensor operou normalmente encontra-se disponibilizado de forma aberta, podendo ser utilizados os mesmos aplicativos do USGS já mencionados no caso das imagens Landsat (*EarthExplorer* e *Glovis*). A partir de 1º de abril de 2016, as agências do Japão e dos Estados Unidos responsáveis pelo ASTER anunciaram que os dados desse sensor passariam a ser distribuídos de forma aberta e sem custos.

### WorldView-3

A partir do início da década de 2000, e com a entrada de empresas comerciais no campo do SR orbital, começaram a surgir os primeiros sensores de alta resolução espacial. Quase todos foram configurados com dois sistemas imageadores, sendo um deles tipicamente com 4 bandas multiespectrais cobrindo as regiões do visível e infravermelho próximo com uma resolução espacial entre 3 e 1 m, e o segundo composto por uma única banda pancromática, com resolução espacial abaixo de 1 m. O primeiro desses sensores a entrar em operação foi o Ikonos (2000), seguido do QuickBird (2001), WorldView-1 (2007), GeoEye-1 (2008) e WorldView-2 (2009). Este último tem, no sensor multiespectral, bandas com resolução espacial de 1,85 m e, no sensor pancromático, de 0,46 m. A esses sensores vieram se juntar o do Pleiades-1A (2011) e Pleiades-1B (2012), com bandas multiespectrais com 2 m de resolução espacial e pancromática com 0,5 m.

Contudo, esses sensores de alta resolução espacial, embora com enorme capacidade de visualização de objetos na superfície, capacidade esta comparável à

das fotografias aéreas, pouco têm a oferecer do ponto de vista de caracterização de minerais e rochas. O motivo é que suas bandas espectrais não cobrem as regiões do EEM em que muitos minerais apresentam características diagnósticas. Mesmo assim, imagens desses sensores foram e continuam sendo largamente utilizadas em atividades relacionadas principalmente no monitoramento ambiental de áreas de mineração e seus entornos.

Este cenário começou a mudar em agosto de 2014, com o lançamento do *WorldView-3* (WV-3). Com base no sucesso alcançado pelo ASTER, e percebendo a oportunidade de negócios aberta pelo fim das operações daquele sensor, a empresa norte-americana *DigitalGlobe* projetou um sensor de alta resolução espacial, à semelhança dos anteriormente citados, mas com um diferencial voltado especificamente para a indústria de mineração: um conjunto de bandas multiespectrais posicionadas em regiões estrategicamente selecionadas para cobrir feições diagnósticas relacionadas a minerais, a exemplo do ASTER. O resultado foi o WV-3, com oito bandas espectrais distribuídas na região do SWIR, entre 1,195 e 2,365  $\mu\text{m}$ , com resolução espacial de 3,7 m, além de outras 8 bandas nas regiões do visível e infravermelho próximo com resolução espacial de 1,24 m e uma banda pancromática com resolução de 0,31 m.

Por ter entrado em operação há relativamente pouco tempo, ainda não há informações disponíveis sobre o impacto desse novo “super-sensor”, que combina alta resolução espacial e uma resolução espectral especificamente projetada para cobrir as principais feições espectrais diagnósticas de determinados minerais, nas atividades de exploração mineral. Mas um estudo de simulação desenvolvido por Kruse e Perry (2013) mostrou resultados muito significativos e interessantes no mapeamento de minerais de alteração hidrotermal na área de Cuprite, no Estado de Nevada (EUA).

### Hyperion

O Hyperion foi o primeiro sensor hiperspectral a operar em nível orbital. Lançado em novembro de 2000 a bordo do satélite *Earth Observing-1* (EO-1), ele operou durante alguns anos adquirindo imagens de várias regiões do planeta em faixas relativamente estreitas, de 7,5 km de largura por 100 km de extensão, por meio de 220 bandas espectrais entre 0,400 e 2,500  $\mu\text{m}$  e com resolução espacial de 30 m.

A grande vantagem de sensores hiperspectrais em relação aos multiespectrais é a sua destacada capacidade de identificar e analisar a composição químico-molecular dos materiais superficiais. Desse modo, a capacidade de identificar com enorme precisão dife-

rentes fases minerais torna esse tipo de sensor uma ferramenta de grande utilidade na exploração mineral, além de várias outras aplicações.

O Hyperion representou uma plataforma de testes para a tecnologia hiperespectral a partir de satélite e foi utilizado, com relativo sucesso, em um grande número de projetos de pesquisa em todo o mundo, inclusive alguns no Brasil.

Por utilizar tecnologias de meados da década de 1990, o Hyperion apresentou alguns problemas técnicos durante sua operação, como por exemplo uma relação sinal/ruído relativamente baixa, que dificultava a análise quantitativa de seus dados com a necessária precisão. Contudo, as tecnologias atualmente disponíveis permitem a superação de boa parte desses problemas, acreditando-se que a nova geração de sensores hiperespectrais atualmente em desenvolvimento para operar a partir de satélites fornecerá melhores resultados. Dentre os sensores desse tipo em desenvolvimento, destacam-se o EnMAP, da Alemanha, e o HysPIRI, dos Estados Unidos, ambos previstos para entrarem em operação entre 2018 e 2020.

### Radares Imageadores Orbitais

Os radares imageadores (SAR) vêm sendo utilizados desde a década de 1960 a partir de aviões, e da década de 1970 a partir de satélites. É possível medir a distância sensor/alvo pelo registro do tempo entre a emissão das ondas eletromagnéticas e a recepção do sinal retroespalhado da superfície. Variações na distância medidas em diferentes aquisições permitem a detecção de deslocamentos na superfície, com precisão milimétrica, sendo este o princípio da tecnologia denominada Interferometria Diferencial (DInSAR), de enorme utilização na detecção de atividades sísmicas, de escorregamentos de terra, monitoramentos de obras de geotecnia, exploração de hidrocarbonetos e estabilidade de taludes em mineração (PARADELLA et al., 2012). Assim, pode-se dizer que o uso combinado desses dois tipos de tecnologias de SR, em duas regiões distintas do EEM, fornece informações complementares sobre os materiais e fenômenos presentes na superfície da Terra.

Satélites com sensores SAR mais comuns utilizam comprimento de onda nas bandas X (3 cm), C (5 cm) ou L (23 cm). O primeiro SAR orbital foi o SEASAT em 1978, sendo seguido pelo lançamento do ERS-1 em 1991. Os principais sistemas em uso atualmente são: o alemão TerraSAR-X/TanDEM-X (banda X, dois satélites), o italiano Cosmo-Skymed (banda X, quatro satélites), o europeu Sentinel-1 (banda C, um satélite), o canadense RADARSAT-2 (banda C, um satélite) e o japonês ALOS/PALSAR-2 (banda L, um satélite).

As imagens SAR fornecem boas informações sobre a textura dos terrenos, tendo sido usadas rotineiramente para extrair informações geológicas de interesse à exploração mineral, notadamente no tocante às estruturas geológicas (falhas, fraturas, *fabrics* tectônicas e/ou metamórfico, etc) em áreas tropicais em que a presença de vegetação densa dificulta o uso de outros tipos de sensores (PARADELLA et al., 1997). Um exemplo desse uso convencional de imagens SAR para mapeamento geológico é o Projeto RADAMBRASIL, que produziu, nas décadas de 1970 e 1980, mapas geológicos de todo o território brasileiro baseados na interpretação de mosaicos de radar na banda X.

Contudo, os sistemas orbitais SAR modernos, como os acima citados, possuem características tecnológicas avançadas que permitem outras aplicações mais sofisticadas além da interpretação visual de imagens. A evolução da tecnologia tem consolidado três campos de aplicações bem específicos: a radargrametria, a interferometria e a polarimetria. Os dois primeiros já atingiram um estágio de maturidade, com aplicações operacionais em exploração mineral, seja na geração de modelos digitais de superfície pela radargrametria e interferometria, seja na detecção de deslocamentos do terreno (DInSAR).

### Sensores remotos aeroportados

O uso de sensores aeroportados no Brasil é ainda relativamente restrito, em função principalmente dos altos custos envolvidos e à pouca disponibilidade de equipamentos desse tipo no país. Mas existem alguns exemplos e iniciativas que merecem ser citados, envolvendo o uso de tecnologias avançadas de SR a partir de sensores operando a bordo de aeronaves, voltadas para aplicações em exploração mineral e atividades de apoio à mesma.

O sensor hiperespectral ProSpecTIR® VS, da empresa norte-americana SpecTIR, é um dos mais avançados disponíveis em nível mundial, contando com cerca de 350 bandas espectrais que adquirem imagens da superfície no intervalo entre 0,400 e 2,500  $\mu\text{m}$ . Ele apresenta uma ótima relação sinal/ruído e suas imagens permitem análises qualitativas e quantitativas da composição química-molecular dos materiais superficiais, ainda que estes ocorram na forma de misturas no interior de cada pixel da imagem. Suas aplicações potenciais em atividades de exploração mineral no Brasil envolvem não somente a identificação e quantificação da ocorrência de fases minerais em rochas e solos associados a potenciais áreas mineralizadas, mas também análises de anomalias geobotânicas associadas a concentrações minerais no solo e subsolo, entre várias outras aplicações em

geologia e exploração. A comercialização de projetos de aerolevantamentos no Brasil utilizando o ProSpecTIR® VS é feita pela empresa FotoTerra, de São Paulo, que inclui, entre seus clientes, empresas nas áreas de mineração e de hidrocarbonetos.

Outro exemplo de tecnologia avançada de SR por radar disponível no país é o sistema OrbiSAR da empresa BRADAR (Embraer Defesa & Segurança). Trata-se de uma tecnologia única no mundo, originalmente desenvolvida no Brasil pela empresa OrbiSat, que foi posteriormente adquirida pela Embraer. Essa tecnologia se baseia no uso conjunto de dois sistemas SAR, um operando na banda X e o outro na banda P, que permite a geração de mapas com alta precisão altimétrica em áreas de florestas tropicais. Isto ocorre pelo fato da radiação referente à banda X interagir com as copas das árvores enquanto a da banda P, com maior penetração devido ao maior comprimento de onda, interage com a superfície do terreno. A empresa desenvolveu um método pelo qual o sistema SAR da banda X é usado para gerar um modelo digital de superfície por meio da tecnologia DInSAR (interferometria diferencial), que depois é ajustado e transformado em um modelo digital de terreno altamente preciso com o auxílio da banda P. Essa tecnologia tem sido utilizada para gerar mapas topográficos detalhados da região Amazônica e outras regiões brasileiras que não dispõem de cartografia em escala adequada. Não há registros de sua aplicação em geobotânica, mas o potencial é alto: são comuns variações na biomassa e na estrutura de florestas sobre mineralizações e esse método as identifica. Seu uso conjunto com SR óptico em florestas fechadas tem uma notável perspectiva.

## USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NO BRASIL

O SR apresentou um extraordinário desenvolvimento nas últimas décadas, facilitado inclusive pelo uso extensivo da internet. Ferramentas simples de acesso a imagens de qualquer ponto do planeta, tais como o *Google Earth*, passaram a ser usadas não apenas por especialistas, mas pelo público em geral, popularizando o uso de imagens orbitais.

Contudo, no Brasil, o uso profissional do SR em Geologia, e em exploração mineral em particular, não vem seguindo no mesmo ritmo essa tendência internacional, apesar de seu excepcional potencial de aplicabilidade em nosso país, em função de suas características de grandes dimensões e da dificuldade de acesso a muitas regiões. Uma comparação entre o uso do SR especificamente em exploração mineral no Brasil e na Austrália, países de características similares

em termos de suas dimensões e respectivos potenciais minerais, evidencia o grande contraste existente entre o estado-da-arte da tecnologia e a suas aplicações em situações operacionais pelas empresas e em órgãos de governo.

Os dois países contam com considerável massa crítica nessa área em suas instituições acadêmicas, e também em alguns órgãos governamentais. Na Austrália, além das universidades, há diversas instituições governamentais que dão apoio científico e tecnológico à indústria mineral, como o CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) e o *Geoscience Australia*, além de grupos atuantes em diversos de seus serviços geológicos regionais. Além disso, várias empresas do setor mineral australiano mantêm equipes de especialistas nessa área, complementando o trabalho das instituições governamentais. Por último, há na Austrália um setor extremamente ativo de empresas de base tecnológica, que provêm serviços especializados em tecnologias de ponta em SR aplicado à exploração mineral, notadamente na área de SR espectral. Desse modo, constata-se naquele país a existência de um ecossistema científico/tecnológico/industrial de longo prazo muito bem articulado, que vêm atuando com notável êxito, atendendo não apenas ao mercado local, mas também desenvolvendo e exportando tecnologias e serviços para o mundo todo na área de SR aplicado à geologia e à exploração mineral, incluindo hidrocarbonetos.

No Brasil, existem grupos de pesquisa e de formação de profissionais e de pesquisadores ligados a universidades públicas em praticamente todas as regiões do país, além do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instituição pioneira nessa área e histórica formadora de recursos humanos nos níveis de mestrado e doutorado. Já na esfera de órgãos de governo, a CPRM/Serviço Geológico do Brasil, após várias tentativas mais ou menos exitosas ao longo de vários anos, deixou em 2015 de ter uma Divisão de Sensoriamento Remoto em seu organograma. Mesmo durante o período em que contou com essa Divisão, a CPRM não logrou consolidar uma política nacionalmente articulada de fomento à aplicação de tecnologias de ponta de SR na exploração mineral, a exemplo do que fez com sua Divisão de Geofísica. Salvo iniciativas isoladas, geralmente por parte de indivíduos, não há outra instituição governamental atuando nessa área específica do SR que mereça destaque.

Já no setor da indústria, a atuação da Petrobrás, notadamente por meio do seu Centro de Pesquisas (CENPES), vem se destacando no desenvolvimento de tecnologias de uso do SR por radar na detecção de exsudações de hidrocarbonetos, tanto nas áreas *off-shore*,



como também em bacias terrestres, tendo passado a exportar serviços especializados nessa área para outros países. A Petrobrás tem também utilizado e avaliado tecnologias de SR hiperespectral, a partir de imagens do sensor aeroportado Pro-SpecTIR-VS. A Vale também vem se destacando no que tange à análise de tecnologias avançadas de SR, tanto na área de geologia espectral, por meio de experimentos realizados com o sensor aeroportado Pro-SpecTIR-VS e com o equipamento australiano de *core-logging* Corescan, utilizado para caracterização espectral de testemunhos de sondagem de minério de ferro, como também com experimentos utilizando a interferometria de deformação utilizando radar (DInSAR), aplicada ao monitoramento de deformações em áreas de exploração de minérios de ferro e de manganês em Carajás (ver item seguinte). No que diz respeito à caracterização do minério de ferro (*core-logging*), informações disponíveis dão conta que, apesar dos resultados positivos obtidos na fase de testes, essa tecnologia não deve ser implantada de modo operacional em curto prazo, devido aos cortes nos investimentos por que passa atualmente a Vale. A empresa continua, porém, atuando em experimentos-piloto, em colaboração com instituições acadêmicas.

Além das empresas citadas, há outras do setor mineral que empregam o SR como técnica exploratória de maneira ocasional, geralmente por meio de contratos ou convênios com instituições acadêmicas e/ou empresas de consultoria, mas sem manter equipes especializadas e dedicadas ao tema. Quanto a estas últimas, e diferentemente de outros países de grande potencial mineral, como Austrália e Canadá, há no Brasil pouquíssimas empresas com capacitação tecnológica plena para atuar em consultoria ou prestação de serviços utilizando tecnologias avançadas de SR. Existe, portanto, necessidade em muitos casos de se recorrer a empresas internacionais para essa finalidade.

### **O sensoriamento remoto com radar na exploração mineral e de hidrocarbonetos**

Em função das características fisiográficas intrínsecas da Amazônia, que corresponde a uma parte expressiva do território nacional e é uma importante fronteira para a exploração mineral e de hidrocarbonetos, enfoca-se nesta seção o uso específico do radar.

A maior parte da Amazônia exibe cobertura vegetal densa e relevo controlado por estruturas geológicas e características erosivas do substrato, o que favorece o uso de radar, sensor que maximiza o realce topográfico. Deste modo, o radar tem sido a opção adequada para levantamentos geológicos na Amazônia desde o início da década de 1970, com os levantamentos

aeroportados do RADAMBrasil e, posteriormente, as missões posteriores do SAREX-92 (INPE) e da Intera (Docegeo) em 1992, ambas em parceria com instituições canadenses. Esse impulso inicial no uso de sensores aeroportados foi ampliado com o advento dos sensores SAR orbitais (ERS-1 e 2, JERS-1, RADAR-SAT-1). A grande disponibilidade de imagens com diferentes características (frequência, polarização, etc.), evidenciou a necessidade de capacitação no país, o que levou ao programa GlobeSAR-2 em meados da década de 1990, com a participação do INPE, universidades, empresas e agências governamentais, por meio de cursos de capacitação, treinamentos e pesquisa com imagens RADARSAT-1 e aplicações em mapeamento geológico, pesquisa mineral e petrolífera (PARADELLA et al., 1997).

Posteriormente, por iniciativa da ADIMB (Agência para o Desenvolvimento da Indústria Mineral Brasileira), e com o apoio do PADCT III/MCTI, foi desenvolvido o projeto “Exmin-Amazônia” (Plataforma para o Desenvolvimento Metodológico em Exploração Mineral), no qual foi priorizado o uso conjunto de SR por radar e de aerogeofísica em levantamentos geológicos básicos na Amazônia (ADIMB, 2000).

Esse conjunto de iniciativas propiciou o desenvolvimento de uma grande experiência no país com relação à adaptação de técnicas de fotogeologia (mono e estereoscopia) e de processamento digital de imagens às características das imagens de radar (imagens de amplitude). O foco desses projetos foi nos estudos estruturais, tectônicos também na fusão de dados (SAR-ópticos, aerogeofísica) voltados ao mapeamento geológico e à pesquisa mineral. Neste sentido, merece também menção a experiência adquirida pela Petrobras na análise de dados de radar como suporte à exploração petrolífera nas bacias do rio Amazonas-Solimões, que remonta à década de 1980, com a utilização de mosaicos do RADAMBrasil e interpretações morfoestruturais realizadas na década seguinte empregando mosaicos do JERS-1.

Se analisada de modo generalizado, a tendência dessas aplicações vem dando ênfase à extração qualitativa da informação, restrita a imagens da amplitude do sinal retroespalhado. Todavia, imagens SAR representando a polarização e a fase são também atributos importantes de informação dos alvos geológicos, que requerem para sua utilização a compreensão dos mecanismos complexos de interação micro-ondas/alvo e sistemas mais avançados de radar (interferométricos, polarimétricos). A disponibilidade deste tipo de imagens marca a fase atual de desenvolvimento tecnológico, com o emprego crescente de abordagens quantitativas.

No contexto de incorporação de radar no segmento industrial duas abordagens merecem destaque. Na Petrobras, deve ser mencionado o uso operacional de diferentes sistemas comerciais (RADARSAT-2, TerraSAR-X, Cosmo-Skymed, etc.) na detecção de exsudações de hidrocarbonetos na superfície do mar para suporte à exploração petrolífera de águas profundas e no monitoramento ambiental de áreas oceânicas e costeiras na detecção de diferentes tipos de poluição marinha ligados à exploração petrolífera (BENTZ et al., 2005). No caso da Vale S.A., resultados encorajadores foram recentemente obtidos com a interferometria de deformação (DInSAR) aplicada ao monitoramento de deformações em taludes de cava, pilhas de estéril, barragens de rejeitos e demais estruturas que compõem o complexo minerador das minas a céu aberto de ferro e de manganês de Carajás. As vantagens da DInSAR sobre técnicas de monitoramento de campo (prismas, radar de campo) são que as medidas obtidas são de elevada acurácia (escalas milimétricas de deslocamentos), cobrindo uma grande área (visão sinóptica), com grande densidade de amostragem e sem necessidade de instrumentação de campo. A Vale cogita atualmente a incorporação dessa tecnologia como ferramenta preditiva no monitoramento contínuo de suas áreas de operação no país (VASCONCELOS, 2015).

### Estudos de caso no Brasil

São apresentados a seguir quatro estudos de caso desenvolvidos no Brasil, cada um deles enfocando uma aplicação distinta de técnicas de SR em atividades de exploração e de exploração de recursos minerais. Na seleção desses casos, foi considerada também a diversidade em termos das condições fisiográficas e climáticas das áreas onde foram desenvolvidos.

#### Geobotânica por Fenologia em Sequência do Evento Ígneo Paleoproterozoico Uatumã, Pará<sup>1</sup>

De acordo com Fernandes et al. (2011 e referências aos trabalhos do grupo de Caetano Juliani aí citadas), na região de São Félix do Xingu (PA) há rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas associadas ao evento ígneo Uatumã, do paleoproterozoico. Às rochas vulcânicas da formação basal Sobreiro (1,88Ga) seguem-se as da formação Santa Rosa (1,87 Ga), que compreende uma complexa variedade de rochas vulcânicas, subvulcânicas e plutônicas, incluindo fluxos de lava e diques de riolito, ignimbritos, tufos e brechas, diques e stocks de pórfiros graníticos e granitoides equigranulares.

Foi aí aplicada a menos usual das formas de geobotânica por SR, aquela que considera a variabilidade fenológica associada à geologia. Ainda que rara na literatura, a geobotânica fenológica foi indiretamente citada no século XVI por Georgius Agrícola, considerado o pai da Geologia enquanto ciência, que afirmou haver presença de senescência precoce e rebrota tardia da vegetação sobre depósitos minerais. A fenologia da vegetação é o estudo do ciclo da vida das plantas, que é influenciada pelas variações climáticas sazonais e por características físicas e biológicas do ambiente. A fenologia da superfície terrestre (*Land Surface Phenology* – LSP) é definida como o padrão sazonal de variação espectral em superfícies vegetadas observado a partir de dados multitemporais de SR.

O método utilizado pode ser entendido conceitualmente como uma fusão do método sistêmico (ALMEIDA et al., 2009 e referências aí citadas) com a LSP clássica. Enquanto esta última utiliza séries temporais de imagens com índices de vegetação, o método sistêmico procura abordar a cobertura vegetal como um sistema realçando a resposta espectral de compostos foliares, os quais tem interdependência. O método aqui utilizado considera a variação espectral das coberturas vegetais no visível (pigmentos foliares), infravermelho próximo (área foliar, estrutura do dossel) e infravermelho ondas curtas (água foliar e compostos bioquímicos) em dois momentos climáticos.

No caso específico deste capítulo foram utilizadas imagens Landsat/TM (órbita 225, ponto 065) de 09/5/1987 e de 15/7/1984, com a área de pesquisa imediatamente a oeste da cidade de São Félix do Xingu, sul do Estado do Pará. Estas duas imagens conciliavam a ausência de nuvens com período em que a floresta local estava preservada e em momentos fenológicos distintos. Foi aplicada análise por principais componentes (APC) (matriz de correlação) nos pares de datas das bandas TM2, 3, 4, 5 e 7. A informação não redundante é concentrada na PC2, que assim informará da variação espectral essencialmente associada ao dossel florestal. Para concentrar e hierarquizar a informação da variabilidade espectral uma nova APC foi aplicada sobre as cinco PCs2, seguindo-se uma filtragem passa-baixas de grandes dimensões para realçar tendências.

A imagem final (Figura 2) evidencia uma notável variabilidade fenológica e sua comparação com o mapa geológico (Figura 2) tem excelente correlação com as unidades vulcânicas das formações Sobreiro (orogênica e cálcio-alcalina) e Santa Rosa (alcalina do tipo A) e com suas variações faciológicas. Essas unidades apresentam zonas de alterações hidrotermais com indícios de mineralizações distintas, destacando-se

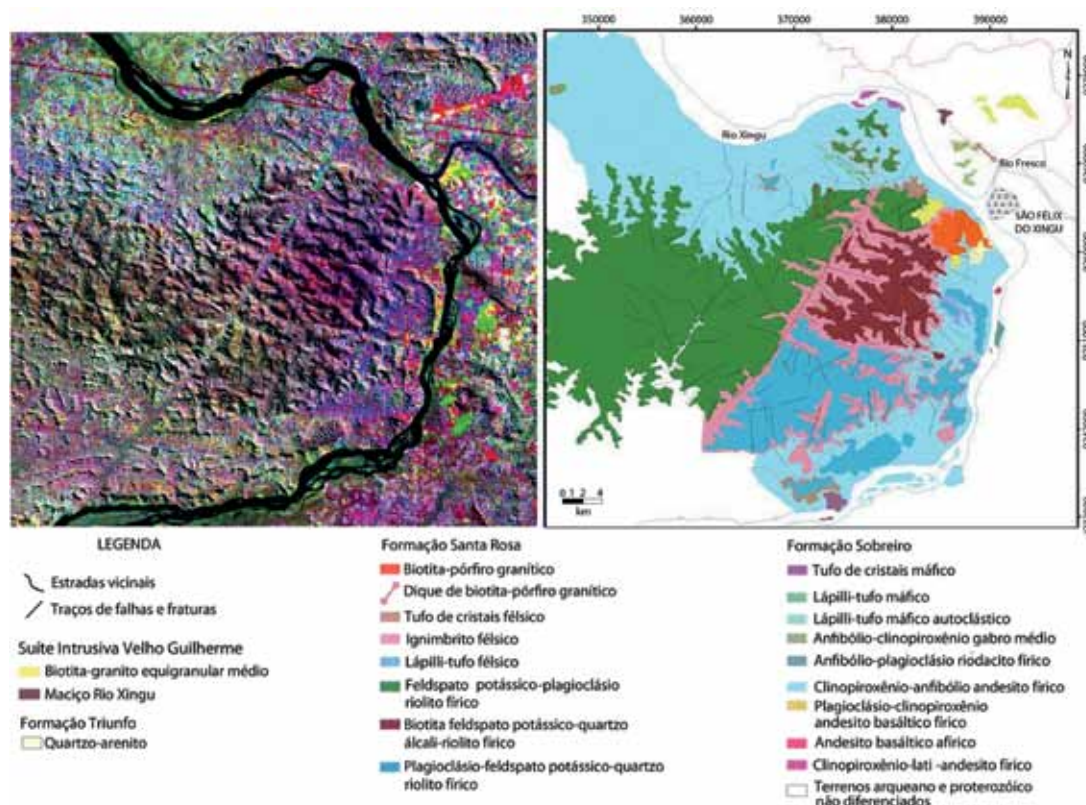
1 Estudo de caso desenvolvido por Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida (Instituto de Geociências – USP)

as epitermais *high-* e *low-sulfidation* com Au, Ag e metais de base na Formação Sobreiro e epitermais *low-sulfidation* de metais preciosos na Formação Santa Rosa, o que demonstra grande potencial desta técnica na seleção de unidades em trabalhos de exploração mineral. A técnica permitiu ainda a identificação de stocks subvulcânicos de pórfiros o tipo A, aos quais podem se associar mineralizações de estanho, bem como de ouro do tipo *intrusion-related gold systems*. Considerando o potencial mineral destas formações indica-se haver grande potencial de aplicabilidade do método em fases iniciais de programas de exploração mineral em regiões recobertas por florestas tropicais.

### Monitoramento de Estabilidade das Minas de Ferro de Carajás com Imagens do Satélite TerraSAR-X por meio da Interferometria Diferencial (DInSAR)<sup>2</sup>

A Província Mineral de Carajás/PA engloba as maiores reservas do planeta em minério de ferro, com exploração realizada através de minas a céu aberto. Atualmente, as atividades da mineradora Vale S.A. em Carajás

- 2 Estudo de caso desenvolvido por Waldir R. Paradella<sup>a</sup>, José C. Mura<sup>a</sup>, Fabio F. Gama<sup>a</sup>, Athos R. Santos<sup>a</sup>, Guilherme G. Silva<sup>a</sup>, Mauricio Galo<sup>b</sup>, Paulo O. Camargo<sup>b</sup>, Arnaldo Q. Silva<sup>c</sup> (<sup>a</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, <sup>b</sup> Faculdade de Ciência e Tecnologia - UNESP, <sup>c</sup> Instituto de Geociências - UFPA).



**Figura 2** PCs 435 em RGB de imagem TM Landsat composta (processamento descrito no texto) e mapa geológico das formações Sobreiro e Santa Rosa (evento ígneo Uatumã do Paleoproterozoico) na região de São Félix do Araguaia (Fonte: Elaborada por Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida, a partir de figuras de Teodoro Isnard Ribeiro de Almeida - esquerda; FERNANDES et al., 2011 - direita).

estão concentradas nos depósitos de N4 (minas N4E e N4W) e N5 (minas N5W e N5E). Instabilidades podem ser esperadas na região devido às escavações profundas realizadas em produtos rochosos de baixa qualidade geomecânica, ao uso de explosivos e intensa precipitação. É importante notar que pequenos movimentos em taludes podem ser precursores de rupturas maiores. Assim, dispor de informações sobre estabilidade de taludes é um item importante na indústria de mineração por obrigações legais (normas reguladoras de lavra), de segurança (vidas e equipamentos), planejamento de produção, etc.

Dois abordagens da Interferometria Diferencial com imagens SAR (DInSAR) têm sido recentemente utilizadas na estimativa precisa do deslocamento de superfície em mineração: a PSI (*persistent scatterer interferometry*), que utiliza a informação da fase interferométrica de pontos (pixels) com propriedades de espalhamento, que variam pouco com o tempo e geometria de visada, e a DTS (DInSAR *Time-Series*), que explora a informação de fase de imagens complexas de radar, adquiridas em diferentes épocas (pares interferométricos), com amostragem em área. A PSI fornece uma melhor acurácia deformacional que a DTS. A DTS permite, todavia, detectar deformações com taxas mais elevadas, mas ao custo de uma menor resolução espacial.

Através de um conjunto de 33 imagens StriMap do satélite TerraSAR-X (TSX), as duas soluções técnicas foram testadas em Carajás, em um projeto de pesquisa com apoio da Vale S.A. e FAPESP (proc. FAPESP 2010/51267-9). Resultados valiosos foram obtidos na descrição de deslocamentos com uso das duas abordagens (MURA et al., 2014; PARADELLA et al., 2015) e exemplificados na Figura 3.

Espera-se que a tecnologia de interferometria diferencial SAR possa ser inserida como uma alternativa inovadora e complementar aos métodos operacionais de medições geotécnicas de campo (uso de estação total/prismas refletivos e radar de campo), na detecção e monitoramento de deslocamentos que possam resultar em instabilidades das áreas de atuação da Mineradora.

### Detecção de Minérios de Fosfatos em Imagens do Sensor ASTER<sup>3</sup>

O Brasil possui cerca de 80% das suas jazidas fosfáticas provenientes de rochas de origem ígnea, com presença acentuada de rochas carbonatíticas de baixo teor em

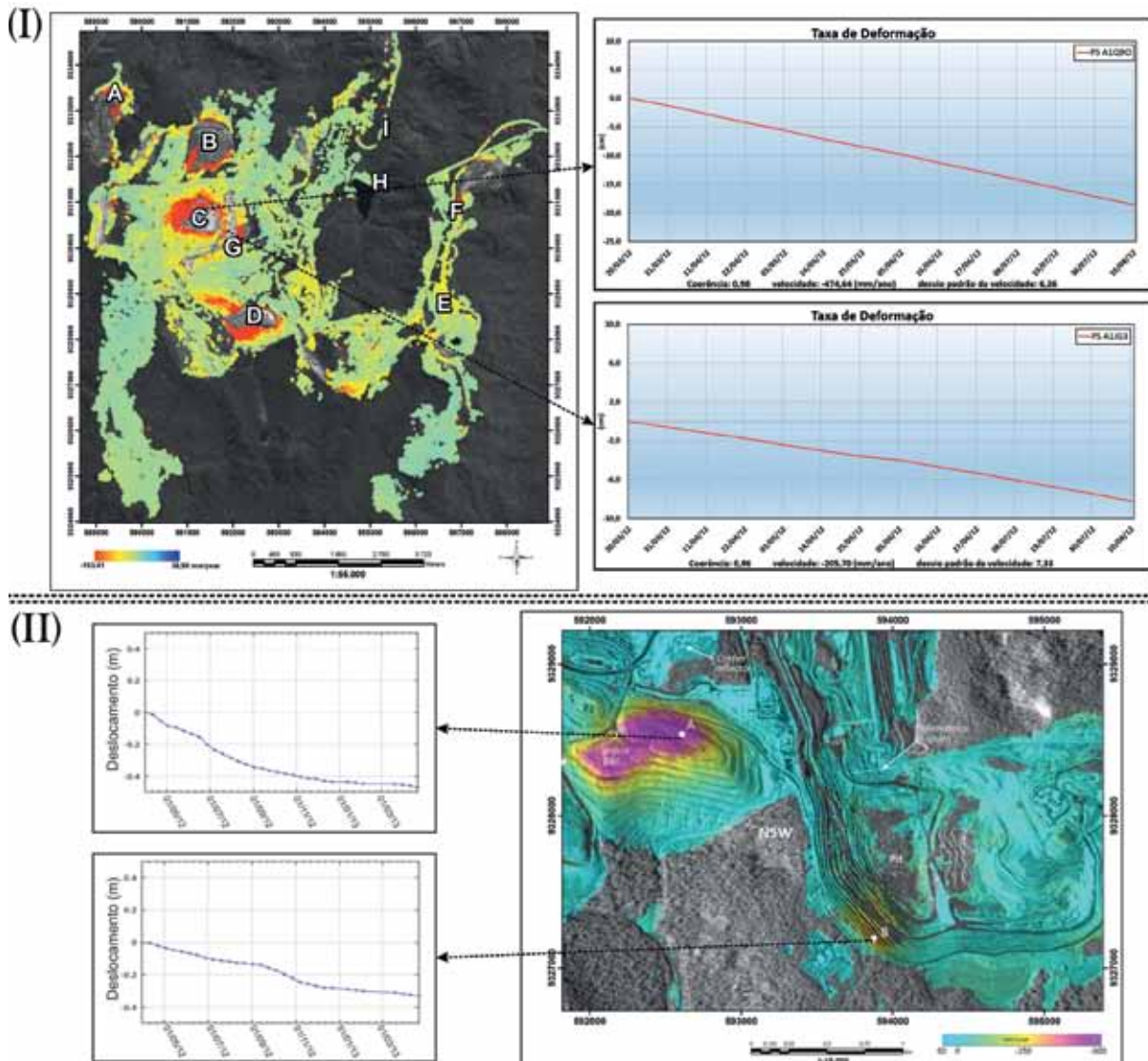
P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. As reservas dos depósitos ígneos somados aos de origem sedimentar atendem apenas 40% da demanda brasileira por fertilizantes fosfáticos. O complexo de Catalão I, um domo intrusivo alcalino localizado na fronteira do Estado de Goiás com o Triângulo Mineiro, formado por rochas piroxeníticas cortadas por numerosos veios e *plugs* carbonatíticos e foscóritos apatíticos, acumula um reserva lavrável de 196.10<sup>6</sup> toneladas com teor médio de 8,5% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. No interior da intrusão afloram rochas, principalmente dos tipos carbonatítica dolomítica, flogopitito com foscóritos, foscórito com monazita e foscórito carbonatíticos, que encerram as mineralizações mais importantes. Estas rochas foram o foco da presente pesquisa, tendo como perspectiva uma avaliação do uso das imagens do sensor ASTER para a detecção de minérios fosfáticos.

O trabalho consistiu em estabelecer uma relação entre os espectros de reflectância de campo e de bibliotecas espectrais de minerais, com as imagens ASTER dos módulos do visível-infravermelho próximo (3 bandas), infravermelho de ondas curtas (6 bandas) e do termal (5 bandas), recorrendo-se à técnica computacional SFF (*Spectral Feature Fitting*) de classificação espectral de imagens.

Os resultados da classificação das imagens ASTER (Figura 4) mostraram alta concordância das áreas classificadas nas imagens com as áreas de mineralizações, além de indicar a presença de várias outras áreas potenciais. Com base nas associações minerais obtidas por difratometria de raios-X em 15 amostras coletadas em campo e seus respectivos espectros de reflectância, os seguintes resultados foram obtidos com os três módulos das imagens ASTER. Com as imagens do módulo do visível-infravermelho (0,52–0,86µm) foram classificadas áreas com a presença de monazita, que é um mineral com fosfato associado em sua composição a terras raras (Sm, Nd). Uma amostra de foscórito alterado coletada em campo mostrou em difratograma de raios-X a presença de quartzo+goethita+monazita, com exibição de um espectro com forte absorção em 0,81µm (banda 3N ASTER), devida às transições eletrônicas de íons trivalente de elementos de terras raras. Na faixa do infravermelho de ondas curtas os espectros das amostras coletadas distinguiram quatro grupos minerais: grupo 1 foscórito apatítico dolomítico com absorções em 1,434µm, 1,908µm, 2,0µm, 2,32µm e 2,38µm; grupo 2 foscórito hidroxiapatítico impuro com absorções em 1,434µm, 1,935µm, 2,225µm e 2,440µm; grupo 3 foscórito flogopitítico dolomítico com absorções em 1,292µm, 1,394µm, 1,915µm, e 2,325µm; grupo 4 foscórito carbonatítico com absorções em 1,384µm, 1,862µm, 1,928µm, 2,136µm,

3 Estudo de caso desenvolvido por Paulo Roberto Meneses e Gustavo Macedo de Mello Baptista (Instituto de Geociências – Universidade de Brasília).



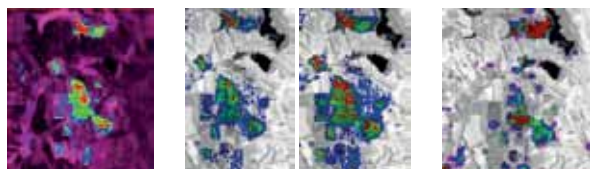


**Figura 3** (I) Distribuição espacial de pontos de medidas obtidos pela abordagem PSI (modelagem SqueeSAR™) para as minas de ferro do Complexo de Serra Norte usando 14 imagens TSX (23/Março-10/Agosto, 2012), visualizada pela taxa de velocidade de deformação (mm/ano). Foram identificados 123.955 pontos, com densidade média de 800 pontos/km<sup>2</sup>. As cores na barra de deformação são indicativas de sentido de movimentação: vermelho = afastamento do SAR ao longo de sua linha de visada (provavelmente subsidência), azul = aproximação do SAR (provavelmente alcantamento). A maior parte do complexo mineral não apresentou deslocamentos durante o período monitorado (regiões verde-azuladas). Áreas com deformação (regiões amarelo-avermelhadas) foram detectadas para pilhas de material estéril (letras A, B, C, D e F) e taludes de corte (G). Exemplos de perfis de deformação/tempo para recalque em pilha (superior) e talude de corte (inferior); (II) Resultados da abordagem DST (software Gamma RS) para a mina de N5W e a pilha de estéril (PDE) SIV, mostrando velocidades de deformação (mm/ano) com uso de 33 imagens TSX (período de 20/Março, 2012 a 20/Abril, 2013). Os perfis de deformação/tempo correspondem a pontos amostrados de deformações em taludes de aterro da PDE (superior) e de talude de cava (inferior) (Fonte: Elaborada por Waldir Renato Paradelia, José C. Mura, Fabio F. Gama, Athos R. Santos, Guilherme G. Silva, Mauricio Galo, Paulo O. Camargo e Arnaldo Q. Silva).



2,264µm, 2,32µm, e 2,456µm. As classificações com as imagens ASTER do módulo infravermelho de ondas curtas (1,60µm-2,430µm) mostraram, para esses quatro grupos minerais, alta semelhança das áreas classificadas na região da mina, além de indicarem a presença coincidente de dois outros alvos fora dos limites da mesma. Com as imagens ASTER do módulo termal (8,125µm – 11,95µm) recorreu-se ao espectro da apatita da biblioteca espectral da Arizona State University, tomado com *endmember* para a classificação SFF, e que tem no comprimento de onda de 9,1 µm a feição de emissividade diagnóstica da apatita. Notou-se uma proximidade bem grande das áreas classificadas com aquelas obtidas pelas imagens do infravermelho de ondas curtas.

O conjunto dos resultados obtidos indica que as imagens ASTER dos módulos do infravermelho de ondas curtas e do termal mostram boas possibilidades para a detecção de áreas fosfáticas de origem ígneas. Estudos similares usando as imagens ASTER para a detecção de ocorrência de fosfatos de origem sedimentar mostraram, na região das minas de Campos Belo (GO), uma excelente perspectiva para as imagens do módulo termal, em comparação imagens da faixa óptica.



**Figura 4A** Vis.-infrav. próximo  
**Figura 4B e C** Infravermelho de ondas curtas  
**Figura 4C** Termal

**Figura 4** Da esquerda para a direita classificação espectral SFF das imagens ASTER dos minerais monazita; flogopita-dolomita-hidroxiapatita; Apatita-dolomita; apatita (Fonte: Elaborada por Paulo R. Meneses e Gustavo Macedo de M. Baptista).

### Caracterização Espectro-mineralógica e Mapeamento de Pegmatitos Graníticos da PPB<sup>4</sup>

A Província Pegmatítica da Borborema – PPB (SCORZA, 1944) é uma das mais importantes e extensas províncias dessa natureza do país. No nordeste brasileiro, destaca-se como uma região favorável ao desenvolvimento de aplicações de SR, considerando a fisiografia regional de clima semi-árido, solos pouco espessos, vegetação escassa, precipitação pluviométrica mal distribuída e longos períodos de estiagem, favorecendo a exposição superficial de muitos pegmatitos. Na PPB estão cadas-

trados centenas de pegmatitos homogêneos (simples, usualmente estéreis) e heterogêneos (JOHNSTON JR., 1945), estes últimos, via de regra, produtores de minerais de Ta-Nb, Sn, Be, Li (Da SILVA et al., 1995; BEURLIN et al., 2014), de minerais industriais e gemas raras, como a Turmalina Paraíba (ROSSMAN et al., 1991), além de variadas fases de minerais raros e exóticos (BEURLIN et al., 2003, 2004).

A mineralogia relativa à cristalização primária, de alteração metassomática-hidrotermal e supergênica, é bastante diversificada e está relacionada com processos de caulinitização, sericitização, turmalinização, lepidolitização, entre outros, incluindo minerais silicatos, sulfetos, carbonatos, óxidos e fosfatos (Da SILVA; DANTAS, 1984; SCHUCKMANN; GOPINATH, 1989). Muitos destes mineirais são portadores de feições de absorção espectral diagnósticas na região do espectro eletromagnético que se estende de 400 nm a 2500 nm.

O pressuposto da pesquisa foi de que a espectroscopia de reflectância e de imageamento podem contribuir para o conhecimento de pegmatitos, a partir da caracterização de ocorrências, natureza das associações mineralógicas e seus relacionamentos (SILVA, 2009). A área de pesquisa está limitada pelas coordenadas 06° 45' 00" e 07° 15' 00" de latitude sul e 36° 20' 00" e 36° 50' 00" de longitude oeste, na região limítrofe dos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. A área abriga a maioria dos pegmatitos hospedados em muscovita-quartzitos da Formação Equador, do Grupo Seridó, na faixa de dobramentos Seridó - FSe (JARDIM DE SÁ, 1994).

A caracterização mineralógica foi realizada com o espectrorradiômetro portátil *FieldSpec Full Resolution Pro*, da *Analytical Spectral Devices*. Na análise e interpretação das curvas de reflectância espectral foram empregados os aplicativos *The Spectral Geologist/TSG-4 PRO* (CSIRO, 2008), o *SIMIS FS 1.6* (MACKIN, 2002) e o programa *Environment for Visualizing Images* – ENVI (RSI 2008), além do apoio da difração de raios X, petrografia e MEV-EDS, para definir as associações, estabelecer zoneamentos internos e o mapeamento com dados hiperespectrais EO1/Hyperion (SILVA, 2009). Na correção dos dados Hyperion foram utilizados os aplicativos *MMTG A-List* (CSIRO, 2002) e *FLAASH/ENVI* (RSI, 2008).

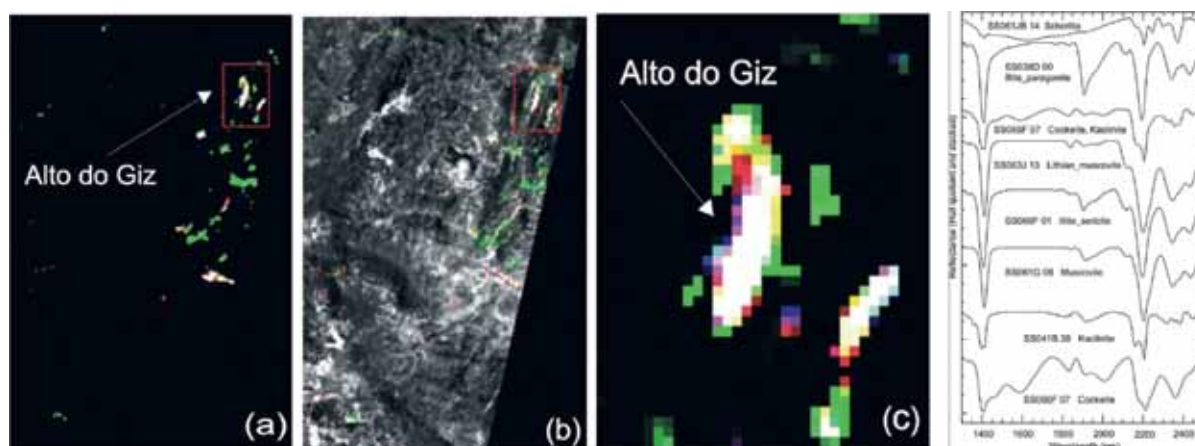
Com base nas feições diagnósticas de absorção espectral foi caracterizada um suíte de minerais e mistura minerais, compreendendo caulinita e halloysita (1395 nm e 1413 nm devido à presença de OH<sup>-</sup> e H<sub>2</sub>O; 2158 nm e 2201 nm devido à ligação AL-OH), muscovita e illita/sericita (1400 nm e 1900 nm, devido à presença de H<sub>2</sub>O e OH<sup>-</sup>; 2180 nm e 2228 nm, 2340 nm e 2430 nm devido

4 Estudo de caso desenvolvido por Sebastião Milton Pinheiro da Silva (Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN).

à ligação Al-OH), paragonita (2180 nm, 2193-2195 nm devido à substituição de K por Na na muscovita, 2340 e 2430 nm devido à ligação AL-OH), clorita/cookeita (1400 nm, 2200 nm, 2167 nm e 2208 nm devido à presença de OH<sup>-</sup> e AL-OH), lepidolita (1400 nm, 1900 nm devido à ligação OH<sup>-</sup> e H<sub>2</sub>O; 2200 nm, 2350 nm, 2437 nm devido à ligação Al-OH; feições menores em 1330 nm, 2030 nm e 2140 nm, devido ao ion OH<sup>-</sup>) e turmalinas (2200 nm, 2300 nm e 2240-2250 nm devido à ligação B-OH). Os resultados da caracterização espectro-mineralógica possibilitaram estabelecer o zoneamento interno e o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal de pegmatito.

mineral, e considerando a capacitação existente em várias instituições acadêmicas e de pesquisa nacionais, o cenário futuro é positivo. Como indicadores disso podem ser citadas a participação, na produção científica internacional, tanto em termos de periódicos como em anais de eventos científicos, de um número expressivo de trabalhos envolvendo aplicações de sucesso, assim como o bom nível de uso do SR em atividades operacionais de exploração por algumas empresas nacionais de grande porte.

Contudo, há ainda obstáculos a serem vencidos em pelo menos duas frentes. O primeiro deles diz respeito à relativa carência de técnicas voltadas à minimização



**Figura 5** (a) Mapeamento de pegmatitos e muscovita-quartzitos da Formação Equador; (b) Sobreposição do mapeamento com a banda 0,559 μm do sensor Hyperion, (c) Detalhe do zoneamento mineralógico do pegmatito Alto do Giz, mediante a composição colorida Caolinita (R) - Muscovita (G) - Paragonita (B), e (d) Espectros de reflectância de minerais de pegmatitos da PPB no intervalo de feições de absorção espectral diagnósticas de 1,4 um a 2,5 um (Fonte: Elaborada por Sebastião Milton Pinheiro da Silva).

Apesar da baixa relação sinal ruído e da resolução espacial reduzida dos dados EO1/Hyperion, frente à dimensão reduzida de muitos pegmatitos, foi possível mapear a distribuição espacial de minerais como muscovita, caolinita e paragonita no pegmatito do Alto do Giz (Figura 5), denotando o alto potencial da espectroscopia de reflectância e de imageamento para estudos de pegmatitos na PPB.

### PERSPECTIVAS FUTURAS DO USO DO SENSORIAMENTO REMOTO EM EXPLORAÇÃO MINERAL

Dado o longo histórico do desenvolvimento de pesquisas e aplicações no Brasil de SR em exploração

das dificuldades impostas ao uso do SR pelas condições típicas de regiões tropicais, como a Amazônia, que representa uma fronteira exploratória da maior importância. Nesse sentido, faz-se necessário o desenvolvimento de pesquisas enfocando a extração de informações de interesse exploratório em condições de densas coberturas vegetais e espessas coberturas de manto intempérico, quer seja a partir apenas de imagens de SR, ou das mesmas em combinação com outros tipos de dados exploratórios, como por exemplo geofísicos e geoquímicos. O segundo obstáculo é a disseminação relativamente reduzida das técnicas de SR em muitas empresas do setor mineral, geralmente pela ausência de profissionais adequadamente treinados no uso dessas técnicas. Atualmente, o setor acadêmico tem plenas condições de formar profissionais com

---

esse perfil, mas talvez haja dificuldade por parte das empresas em incorporá-los aos seus setores de exploração, a exemplo do que já é feito com os geofísicos. Ainda com relação a este ponto, é necessário ter no país empresas especializadas em prestar trabalhos de consultoria/assessoria no emprego de técnicas avançadas de SR na exploração mineral, a exemplo do que ocorre em países com condições geológicas e potencial mineral semelhantes ao do Brasil, como é o caso da Austrália e do Canadá.

A evolução tecnológica do SR exploratório também aponta para algumas tendências futuras. No campo da geologia espectral, devem surgir nos próximos anos um ou mais sensores do tipo hiperespectral, operando a partir de satélites e, portanto, gerando imagens com cobertura global. Embora as tecnologias já sejam disponíveis, os elevados investimentos necessários não permitiram ainda que um projeto dessa natureza pudesse tornar-se operacional. Há previsões para o lançamento de sensores desse tipo para o período 2018-2020. Até lá, o uso de SR hiperespectral na exploração mineral terá de ser suprido por sensores aeroportados, como já vem acontecendo no Brasil com o ProSpecTIR VS.

Há, entretanto, uma forte tendência no uso crescente de sensores operando a partir de veículos aéreos não-tripulados (VANTs) que, pelo menor porte e baixo custo de operação, tendem a tornar mais econômicos os levantamentos de SR a partir de aeronaves. Para poderem ser empregados a partir de VANTs, sensores remotos necessitam passar por processos de miniaturização, algo que já vem ocorrendo. Observa-se que isso diz respeito a sensores que baseados em diodos semi-condutores, operando nas faixas do EEM que vão do visível até as várias sub-regiões do infravermelho, e incluem sensores de alta resolução espectral (hiper-espectrais). Quanto aos sensores de radar, em função dos elevados peso e volume, além da dimensão física da antena SAR, não há ainda expectativa que venham operar a partir de VANTs no futuro próximo.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMS, M. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 21, p. 847–861, 2000.
- ADIMB. *Projeto Exmin-Amazônia* (Desenvolvimento Metodológico em Exploração Mineral para a Amazônia). Brasília: Agência para o Desenvolvimento Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira, 40 p. 2000.
- ALMEIDA, T.I.R.; SOUZA FILHO, C.R.; JULIANI, C.; BRANCO, F.C. Application of Remote Sensing to Geobotany to Detect Hydrothermal Alteration Facies in Epithermal High Sulfidation Gold Deposits in the Amazon Region. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 135–142. 2009.
- ASD. FieldSpec FR. *Analytical Spectral Devices: User Guide*, Boulder, 98 p. 1994.
- BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, 266 p. 2009.
- BENTZ M. C.; POLITANO A.T.; GENOVEZ P. et al. Monitoramento Ambiental de Áreas Costeiras e Oceânicas com Múltiplos Sensores Orbitais. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 57, n. 1, p. 43–47, 2005.
- BEURLIN, H.; THOMAS R.; BARRETO, S. B.; DA SILVA, M.R.R. Nova ocorrência de ferrowodginita em associação com cassiterita, strüverita e tapiolita na Província Pegmatítica da Borborema, Nordeste do Brasil. *Estudos Geológicos*, Recife, v. 13, n. 1, p. 13–35, 2003.
- BEURLIN, H.; CASTRO, C.; THOMAS, R.; DA SILVA, M. R. R.; PRADO-BORGES L. E. Strüverite and Scandium bearing titanian ixiolite from the Canoas Pegmatite (Acari – Rio Grande do Norte) in the Borborema Pegmatitic Province, NE-Brazil. *Estudos Geológicos*, Recife, v.14, n. 1, p. 20–31, 2004.
- BEURLIN, H.; THOMAS, R.; DA SILVA, M. R. R.; MÜLLER, A.; RHEDE, D.; SOARES, D. R. Perspectives for Li- and Ta- Mineralization in the Borborema Pegmatite Province, NE-Brazil: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 56, p. 110–127, 2014.
- CARRINO, T.A.; CRÓSTA, A.P.; TOLEDO, C.L.B.; SILVA, A.M.; SILVA, J.L. Geology and Hydrothermal Alteration of the Chapi Chiara Prospect and Nearby Targets, Southern Peru, Using ASTER Data and Reflectance Spectroscopy. *Economic Geology*, Littleton, CO, USA, v. 110, p. 73–90, 2014.
- CRÓSTA, A.P.; DUCART, D.E.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F.; BRODIE, C. Mineral Exploration for Epithermal Gold in Northern Patagônia, Argentina: From Regional- to Deposit-Scale Prospecting Using Landsat TM and Terra ASTER. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 97–108. 2009.
- CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R. Mineral Exploration with Landsat Thematic Mapper (TM) / Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+): a Review of the Fundamentals, Characteristics, Data Processing and Case Studies. In: BEDELL, R.; CRÓSTA, A.P.; GRUNSKY, E. (Eds.). *Remote Sensing and Spectral Geology - Reviews in Economic Geology*. Littleton, CO, USA: Society of Economic Geologists (SEG), v. 16, p. 59–82. 2009.
- CSIRO. *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization*. TSG Professional 5.0: Industry Standard Spectral Analysis Software for Geoscientists. Sydney, Australia: CSIRO, Division of Exploration and Mining, 2008.
- CRÓSTA, A. P.; SOUZA FILHO, C.R.; AZEVEDO, F.; BRODIE, C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 24, p. 4233–4240. 2003.
- DA SILVA, M. R. R.; DANTAS, J. R. A. A Província Pegmatítica da Borborema - Seridó nos Estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. In: *Principais depósitos minerais do Nordeste Oriental*. DNPM, Série Geologia, n. 24. Seção Geologia Econômica, n. 4. Brasília, p. 235–304. 1984.
- DA SILVA, M. R. R.; HÖLL, R.; BEURLIN, H. Borborema Pegmatitic Province: geological and geochemical characteristics. *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 8, p. 355–364, 1995.
- FERNANDES, C. M. D.; JULIANI, C.; MONTEIRO, L. V. S.; LAGLER, B.; ECHEVERRI-MISAS, C. M. High-K calc-alkaline to A-type fissure-controlled volcano-plutonism of the São Félix do Xingu region, Amazonian craton, Brazil: Exclusively crustal sources or only mixed Nd model ages? *Journal of South American Earth Sciences*, Amsterdam, v. 32, p. 351–368, 2011.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area. Reston: United States Department of the Interior, *Geological Survey Open-file report*, p. 82–675. 1983.
- JARDIM de SÁ, E. F. J. A Faixa Seridó (Província Borborema NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileiro/Pan-Africana. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 803 p. 1994.
- JOHNSTON Jr., W. D. Os pegmatitos berilo-tantalíferos da Paraíba e Rio Grande do Norte, no Nordeste do Brasil. *Rio de Janeiro: DNPM-DFPM*, 85 p. Boletim 72. 1945.
- KRUSE, F.A.; PERRY, S.L. Mineral mapping using simulated WorldView-3 shortwave infrared imagery. *Remote Sensing*, Basel, v. 5, n. 6, p. 2688–2703, 2013.
- LOUGHLIN, W. Principal component analysis in alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 57, n. 9, p. 1163–1170, 1991.
- MACKIN, S. SIMIS. FeatureSearch 1.6. *Spectrometer Independent Mineral Identification Software—user manual and tutorial*. England: SIMIS Solutions S.L., 90 p. 2002.
- MURA, J. C.; PARADELLA, W. R.; GAMA, F. F.; SANTOS, A. R.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G. Monitoring of Surface Deformation in Open Pit Mine Using DInSAR Time-Series: A Case Study in the N5W

- Iron Mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. In: *SPIE RS*, 2014, Amsterdam. Proceedings. Bellingham: SPIE, 2014. v. 9243, p. 924311-1: 924311-12.
- PARADELLA, W. R.; KRUG T.; LANDRY R.; PIETSCH R. W. GlobeSAR-2: o Programa de Avaliação de Dados RADARSAT nas Geociências, *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 27, n. 4, p. 403-406, 1997.
- PARADELLA, W. R.; VENEZIANI, P.; BIGNELLI, P. A.; PIETSCH, R. W.; TOUTIN T. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajas Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 18, p. 1483-1501, 1997.
- PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. E.; SANTOS, A. R. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 64, p. 797-811, 2012.
- PARADELLA, W. R.; FERRETTI, A.; MURA, J. C.; COLOMBO, D.; GAMA, F. E.; TAMBURINI, A.; SANTOS, A. R.; NOVALI, F.; GALO, M.; CAMARGO, P. O.; SILVA, A. Q.; SILVA, G. G.; SILVA A.; GOMES, L. L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, Amsterdam, v. 193, p. 61-78, 2015.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B.; ABRAMS, M.J. 1983. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area. Reston: United States Department of the Interior, *Geological Survey Open-file report*, p. 82-675. 1983.
- ROSSMAN, G.R.; FRITSCH, E.; SHIGLEY, J.E. Origin of color in cuprian elbaite from São José da Batalha, Paraíba Brazil. *American Mineralogist*, Chantilly, v. 76, p. 1479-1484, 1991.
- ROWAN, L.C.; HOOK, S.J.; ABRAMS, M.J.; MARS, J.C. Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Economic Geology*, Littleton, v. 98, p. 1019-1027, 2003.
- RSI. *Environment for Visualizing Images* – ENVI, Version 4.5. The Remote Sensing Platform of Choice. ITT Industries, Inc. 2008.
- SABINE, C. Remote sensing strategies for mineral exploration. In: RENCZ, A. N. (Ed.) *Manual of Remote Sensing*, 3<sup>rd</sup> ed. Hoboken: John Wiley Inc., v. 3, p. 375-447. 1999.
- SCORZA, E. P. *Província Pegmatítica da Borborema: Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: DNPM, DGM, 58 p. (Boletim 112). 1944.
- SILVA, S. M. P da. Espectroscopia de imageamento e gamaespectrometria aérea e terrestre de pegmatitos e granitos da porção sul da Província Pegmatítica da Borborema (PPB), Nordeste do Brasil. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas / UNICAMP, Campinas, 173 p. 2009.
- SCHUCKMANN, W. K.; GOPINATH, T. R. Modelo de ocorrência e gênese de caulim primário nos pegmatitos de Junco de Seridó, Paraíba. In: Simpósio de Geologia do Nordeste. 1989, Fortaleza. *Anais*. Fortaleza: SBG, v. 13, p. 52-54. 1989.
- THOMPSON, A.J.B.; HAUFF, P.L.; ROBITAILLE, A.J. Alteration mapping in exploration: Application of Short-Wave Infrared (SWIR) spectroscopy. *SEG Newsletter*, Littleton, CO, USA, n. 39, Oct./1999.
- VASCONCELLOS, Y. Medidas Espaciais. *Revista Pesquisa FAPESP*, São Paulo. v. Janeiro/2015, n. 227, p. 54-57.
- YAMAGUCHI, Y.; NAITO, C. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *International Journal of Remote Sensing*, Oxford, v. 24, p. 4311-4323, 2003.