

SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL NA DÉCADA DE NOVENTA: NOVAS ABORDAGENS E DESAFIOS EM GEOLOGIA

Raimundo Almeida Filho
Instituto de Pesquisas Espaciais
Ministério da Ciência e Tecnologia
Caixa Postal 515, 12201 - São José dos Campos, SP, Brasil

RESUMO

Além dos novos satélites que darão continuidade aos Programas LANDSAT e SPOT, os anos 90 serão caracterizados por novos sistemas sensores, os quais exigirão novas abordagens para a análise de seus dados. Durante aquele período terá início a coleta sistemática de dados na faixa das microondas, através dos satélites ERS-1, RADARSAT e JERS-1. No Programa EOS, dois sistemas se destacam pelo potencial em aplicações geológicas. O primeiro deles é o sistema SAR com comprimento de onda em banda L (também disponível no JERS-1), cuja principal característica é o maior poder de penetração do sinal na vegetação, fornecendo maiores informações do solo. Acredita-se que tal sistema será de grande valia para estudos geológicos na Amazônia. O outro sistema de grande potencial é o espectrorradiômetro imageador HIRIS. Este sistema obterá 194 imagens simultâneas de um mesmo pixel na faixa espectral de 400 a 2.500 nm, designadas para a identificação de minerais com feições espectrais diagnósticas e estudos geobotânicos. Todo esse avanço tecnológico, ao mesmo tempo em que abre novas perspectivas para o sensoriamento remoto geológico, cria novos desafios de pesquisas e abordagens para o tratamento, análise e interpretação desses dados.

ABSTRACT

Besides the following-up of the LANDSAT and SPOT Programs, a new generation of remote sensing systems will be available in the 90's. The ERS-1, RADARSAT, JERS-1 and Eos-SAR systems will provide, for the first time, a systematically and globally based collection of orbital radar images. Because the good penetration capability of the L-band radar systems through the vegetation cover, JERS-1 and Eos-SAR systems are believed to be a very powerful tool to study the Amazonia. Other very important Eos instrument for geological purposes is the spectrometer HIRIS, which will be able to obtain up to 194 multispectral simultaneous images in the spectral range from 400 to 2.500 nm. It will make possible the direct identification of many minerals on the Earth surface, based on their spectral diagnostic features. At the same time that these new instruments open new opportunities they bring about new challenges to the remote sensing community. If these data are to be used efficiently, new approaches involving both digital imagery processing and interpretation techniques will be required.

1. QUADRO EVOLUTIVO DO SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

1.1 - HISTÓRICO

Com o advento da *Era Espacial* no início dos anos 60, começou a utilização de fotografias orbitais em estudos geológicos, especialmente a partir das missões espaciais americanas TIROS e MERCURY. O potencial demonstrado por estas fotos no reconhecimento de grandes feições geológicas e geomorfológicas, fez com que fosse criado no âmbito da missão espacial seguinte, a GEMINI (1965/1966), o projeto *Synoptic Terrain Photography Experiment*. Este projeto obteve cerca de 1100 fotografias em preto e branco e coloridas de alvos geológicos previamente selecionados. As primeiras fotos multiespectrais a partir do espaço foram obtidas pela missão APOLLO no fim dos anos 60, já servindo como

teste para a escolha das bandas que seriam utilizadas no primeiro satélite de sensoriamento remoto.

O sensoriamento remoto orbital, como nós hoje o conhecemos, teve seu início em 1972 com o lançamento do satélite ERTS-1, posteriormente denominado LANDSAT-1. A década de 70 foi caracterizada como a fase experimental e de implantação do sensoriamento remoto orbital, consolidando-o como uma técnica indispensável à pesquisa e monitoramento de recursos naturais, através da obtenção de dados em escala global e repetitiva. As aplicações e pesquisas com dados obtidos naquele período mostraram que resultados ainda mais significativos poderiam ser conseguidos com sistemas sensores tecnologicamente mais avançados.

Após um período de cerca de 12 anos de uso sistemático de imagens com resolução espacial

de 80 metros (sistema MSS) em quatro bandas espectrais e com resolução radiométrica de no máximo 64 níveis de cinza tornaram-se disponíveis as imagens dos satélites de segunda geração (LANDSAT-5 e SPOT). Com esses sistemas passou-se a utilizar imagens com resoluções espaciais de 30, 20 e 10 metros, registradas em até 256 níveis de cinza. Das quatro bandas espectrais iniciais nas regiões do visível e infravermelho próximo, passou-se a até sete bandas, cobrindo as faixas do visível e do infravermelho próximo, médio e termal.

O começo dos anos 90 marcará o início de uma nova fase do sensoriamento remoto orbital, através da obtenção de imagens na faixa das microondas (Radar), em bases globais e repetitivas, através dos satélites ERS-1 (europeu), RADARSAT (canadense) e JERS-1 (japones). A Figura 1 sumaria algumas características dos principais sistemas de coleta de dados em bases globais e sistemática de interesse para geologia, a partir dos anos 70 e até o final deste século.

1.2 - O PROGRAMA Eos

A segunda metade da década de 90 marcará o início de uma nova fase de sensoriamento remoto orbital, através do programa *Earth Observing System (Eos)*, conduzido conjuntamente pelas agências espaciais dos Estados Unidos da América (NASA), da Europa (ESA) e do Japão (STA). O programa Eos objetiva até o final deste século, o lançamento de quatro estações polares que cruzarão o equador terrestre nos meridianos ascendentes e descendentes nos períodos matutino e vespertino, transportando mais de meia centena de equipamentos sensores, dos mais diversos (NASA, sd/b). Além das quatro plataformas polares, o programa Eos montará, em órbita semi-equatorial, a estação espacial tripulada *space station*, que se constituirá em laboratório espacial para estudos da Terra.

2. SISTEMAS SENSORES COM INTERESSE PARA GEOLOGIA NOS ANOS 90

Além do prosseguimento dos atuais Programas LANDSAT e SPOT, ambos incorporando melhoramentos tecnológicos, durante os anos 90 dois novos tipos de imagens de sensoriamento remoto de grande interesse para geologia estarão disponíveis: as imagens de Radar e as imagens espectrométricas.

Durante os anos 90 grande ênfase será dada aos sistemas de radar orbitais, através dos programas ERS-1, RADARSAT e JERS, os dois primeiros coletando imagens em banda C e o terceiro em banda L. O Programa Eos, através do sistema SAR é programado para obter imagens de radar com resolução espacial de 30 metros, nas bandas X, C e L com ângulos de visadas variando de entre 15° e 65° e com polarização tripla: HH, VV, HR. Acredita-se que os sistemas de radar em banda L (comprimento de onda de 23 cm) serão de grande valia para estudos geológicos em regiões tropicais, dada a maior capacidade

de penetração do sinal na cobertura vegetal e em solos, quando comparados aos sistemas em bandas X e C (Figura 2). Há boas razões técnicas para acreditar-se que tais sistemas serão de grande valia para estudos em regiões de florestas como a amazônia.

Outra grande ênfase do sensoriamento remoto geológico nos anos 90 estará centrada nos sistemas de espectrometria por imagens. Até o presente, a quase totalidade das atividades com sensoriamento remoto tem como meta a *discriminação* espectral do alvo. Em tal abordagem, leva-se em consideração as características espaciais e espectrais da área-alvo e suas relações múltiplas com os demais componentes da paisagem. Uma nova tendência no sensoriamento remoto que tende a se iniciar na próxima década, é o desenvolvimento de sistemas de altas resoluções espaciais e grande sensibilidade radiométrica, denominados de *espectrômetros imageadores*. Tais equipamentos são designados para a *identificação* espectral de alvos, e não mais para a discriminação comparativa, como os sistemas atuais. Tal abordagem, denominada genericamente de *espectrometria por imagens*, consiste na obtenção simultânea de dezenas de imagens espectrais de determinada área unitária (*pixel*), de tal modo que, a partir do grande número de bandas obtidas, pode-se levantar a curva de comportamento espectral do material contido dentro do *pixel* (Figura 3), e, desse modo, tentar identificar o material imageado. A primeira Plataforma Polar do programa Eos, a ser lançada em 1995, transportará um espectrômetro imageador denominado HIRIS (*High Resolution Imaging Spectrometer*). O HIRIS obterá 194 imagens simultâneas de uma área de 30 x 30 metros, na faixa espectral de 400 a 2500 nm e com largura de banda em torno de 10 nm. Tais especificações capacitam o instrumento para a identificação de minerais com feições espectrais diagnósticas e estudos de geobotânica, através da análise de "stress" geoquímico em plantas.

Do ponto de vista do estudo de alvos naturais através da espectrometria por imagem, os estudos de natureza geológica têm praticamente monopolizado as pesquisas neste campo. As pesquisas buscam a identificação de certos minerais ou a identificação de comunidades de plantas biogeoquimicamente alteradas pela presença tóxica de certos minerais no solo. Estudos de radiometria fina têm mostrado que um grande número de minerais portadores dos íons Fe^{+2} , Fe^{+3} , OH^{-1} , CO_3^{-2} e SO_4^{-2} possuem curvas de assinatura espectral com feições diagnósticas que permitem identificá-los por SR. Estas feições diagnósticas são originadas por transições eletrônicas (porção visível do espectro eletromagnético) e vibrações moleculares (região do infravermelho), estando assim, ligadas às características físico-químicas do material.

Nos estudos espectrométricos na área de geobotânica, a faixa espectral sensível ao "stress" geoquímico da folha está situada entre 0,550 a 0,750 nm. Estudos de laboratório,

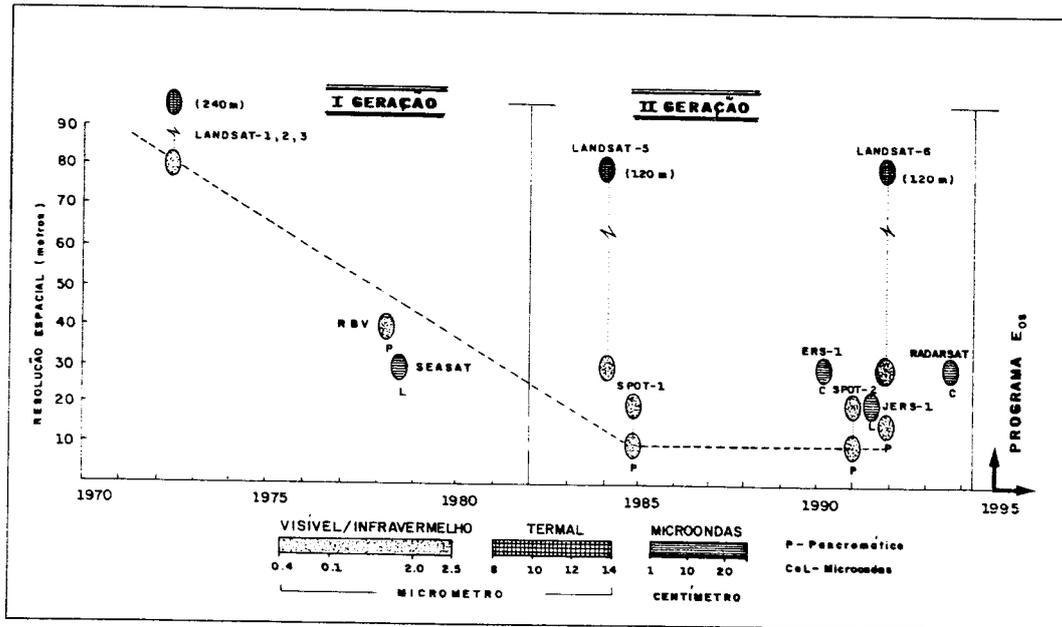


Fig. 1 - Quadro evolutivo do sensoriamento remoto orbital nas décadas de 70, 80 e 90.

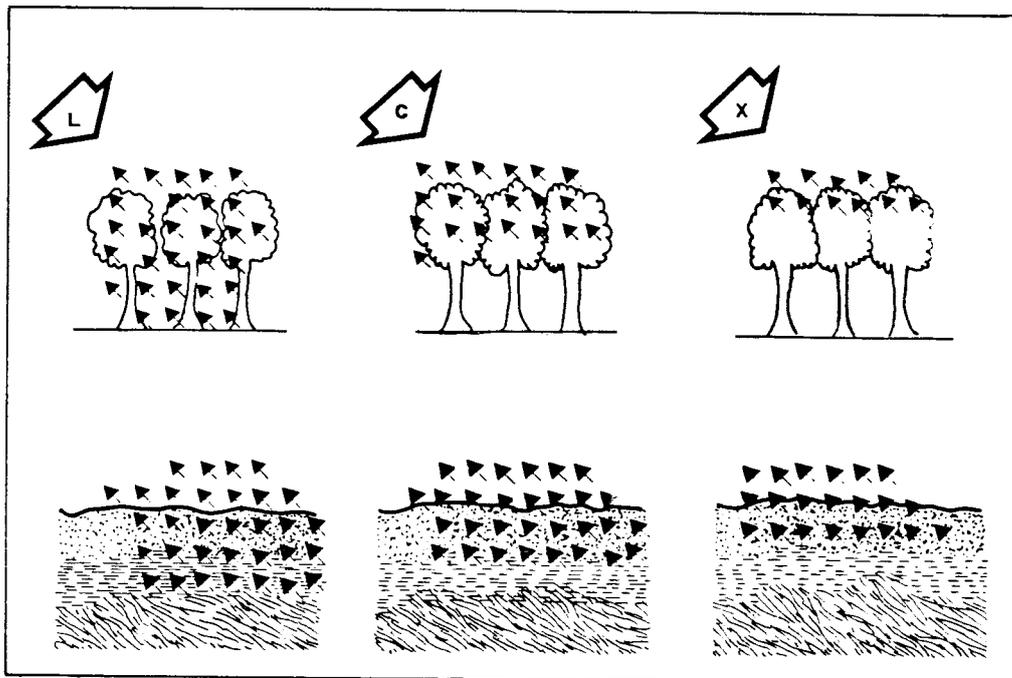


Fig. 2 - Esboço comparativo entre as capacidades de penetração na cobertura vegetal e em solos secos entre sistemas de radar multifrequência (NASA, sd/a)

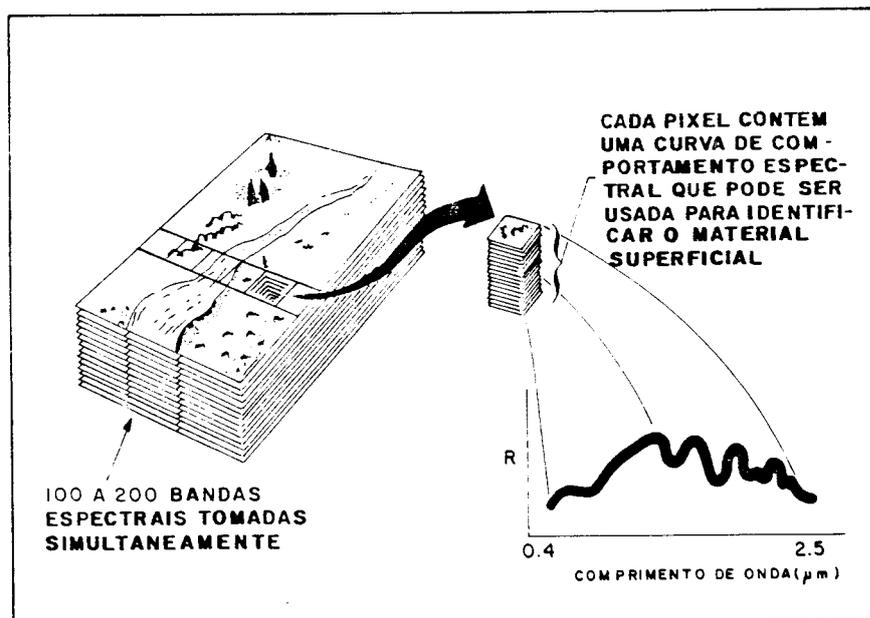


Fig. 3 - Ilustração esquemática de um espectrorradiômetro imageador (NASA, 1987).

confirmados também ao nível de aeronaves (Collins et al., 1983), têm mostrado que comunidades de plantas com altos níveis de toxidez por metal, mostram curvas de comportamento espectral com deslocamento do "red-edge" em direção aos menores comprimentos de onda. Este fenômeno tem recebido a denominação de efeito "blue shift".

Goetz et al. (1985) discutem resultados pioneiros sobre a aplicação da técnica de espectrometria de imagens na identificação mineral no Distrito Cupírfero de Nevada (USA). A Figura 4 mostra um conjunto de curvas espectrais obtidas a partir de imagens (pixels) ao longo de uma faixa de vôo. Comparando-se essas curvas espectrais obtidas a nível da aeronave, com curvas espectrais de alunita $[KAl_3(SO_4)(OH)_6]$ e Kaolinita $[Al_2(Si_2O_5)(OH)_4]$ obtidas em laboratório, pode-se identificar ao longo da faixa sobrevoada os locais de ocorrência desses minerais. É importante acrescentar que para o caso da área em estudo esses minerais argilosos estão geneticamente associados a processos de alteração hidrotermal, e portanto são guias para prospecção mineral.

3. NOVAS ABORDAGENS NA ANÁLISE DE DADOS PARA GEOLOGIA

A pesquisa geológica (prospecção mineral) é uma atividade complexa do ponto de vista científico e bastante onerosa do ponto de vista financeiro. Para conduzi-la eficientemente, o geólogo deve lançar mão de todos os dados disponíveis sobre a área de interesse, com o objetivo de criar, desenvolver ou testar modelos que possam explicar a ocorrência de certo bem mineral ou prognosticar sítios potenciais à sua ocorrência. Para isto, ele é frequentemente obrigado a manusear uma grande quantidade de dados, oriundos de diferentes fontes. Dentre a massa de dados comumente utilizadas pelo geólogo prospector, estão dados geofísicos

e geoquímicos diversos, mapas geológicos em diferentes escalas, mapas estruturais, topográficos, etc., além da grande massa de informações diversas extraídas de dados de sensoriamento remoto.

Com objetivo de reunir toda essa massa de informações em um sistema único de referência (*dados geocoordenados*), facilitando assim a análise integrada de tais dados pelo geólogo, têm sido desenvolvidos os *Sistemas Geográficos de Informações (SGI)*. Tais sistemas permitem ao geólogo manusear e integrar um grande número de variáveis sobre determinada área de interesse, possibilitando-lhe obter informações adicionais além daquelas obtidas a partir dos dados analisados isoladamente.

O Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) vem desenvolvendo um SGI (Figura 5) para atender os objetivos acima mencionados. O sistema aceita a entrada de dados na forma de relatório, tabela, mapas geológicos, geofísicos, de isovalores, etc.), além de imagens digitais diversas. Tais dados são digitalizados e colocados numa base de referência comum, compondo um banco de dados digitais formado por mapas e imagens, tabelas e histogramas. A partir da criação do banco de dados digitais, o usuário passa, através de um terminal de vídeo, a interagir com o sistema, manipulando esses dados. No nosso caso específico, este usuário deve ser um geólogo que, a partir de conhecimentos prévios, tenha hipotetizado um modelo geológico que busque explicar ou prognosticar a ocorrência do bem mineral de interesse ou, mais comumente, de determinado metalotecto. Os documentos oriundos de tais manipulações podem ser obtidos através de um terminal de TV na forma de imagens digitais ou na forma de relatórios e mapas impressos.

De acordo com Walker (11) a validade de qualquer modelo geológico quantitativo para auxílio à pesquisa mineral é dependente: a) do

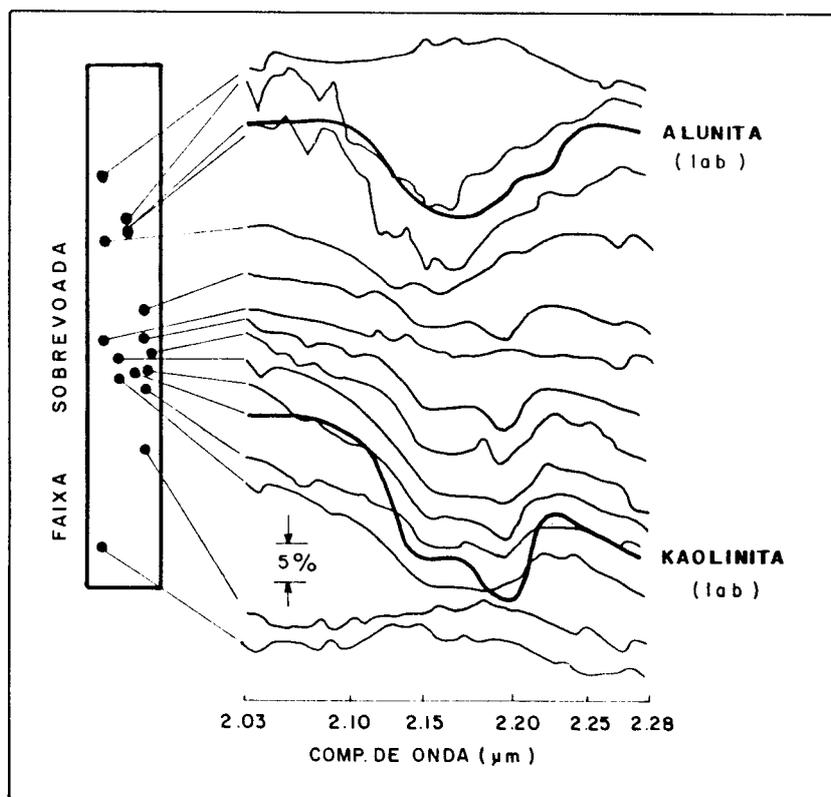


Fig. 4 - Identificação espectral direta de kaolinita e alunita através de espectrometria de imagens (Goetz et al., 1985).

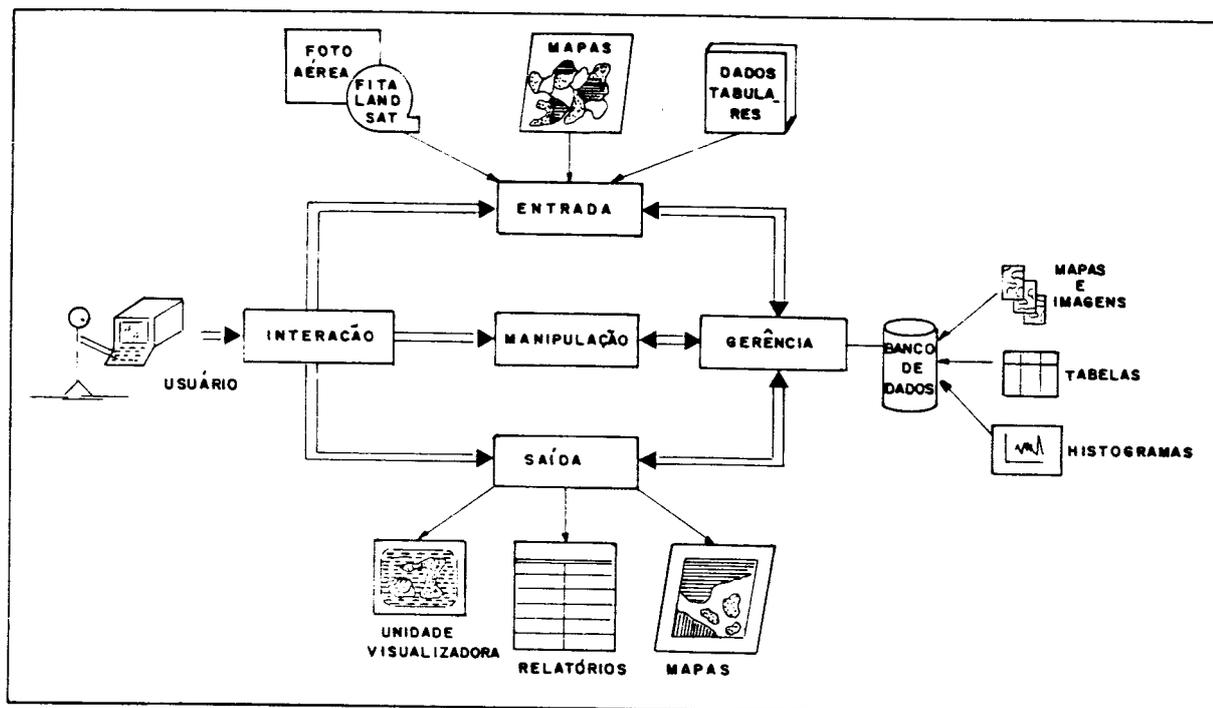


Fig. 5 - Organização do Sistema Geográfico de Informações (SGI) desenvolvido pelo INPE (Oliveira, 1986).

conhecimento geológico sobre a área, o qual é usado para selecionar, correlacionar e associar parâmetros incorporados ao modelo; b) da performance do sistema de processamento de dados digitais utilizados para desenvolver e sustentar o modelo adotado; e c) da habilidade do modelo para indicar com precisão áreas já previamente conhecidas e assim predizer, com maior segurança, sítios potenciais para futuras explorações.

É oportuno mencionar, entretanto, que os sistemas computacionais e os modelos quantitativos de prospecção por eles gerados, jamais poderiam substituir o papel do geólogo de campo. Será sempre o geólogo quem criará os modelos teóricos específicos para cada área, com base em seus conhecimentos prévios, e testará as diferentes hipóteses possíveis para validá-los. Tais técnicas devem ser entendidas apenas como mais uma ferramenta de apoio ao geólogo, visando otimizar a coleta e interpretação de dados, direcionando, assim, as campanhas de campo, com o objetivo básico de reduzir os custos operacionais das mesmas.

4. CONCLUSÕES

Dada as suas dimensões continentais e ao pouco conhecimento geológico do seu território, o Brasil é um dos países que mais se pode beneficiar com o emprego das novas técnicas de sensoriamento remoto, no auxílio à pesquisa de seus recursos minerais. Entretanto, a plena utilização desses dados em aplicações geológicas e o conseqüente desenvolvimento de metodologias específicas às nossas condições de país tropical, é uma tarefa que exige o esforço conjunto de Universidades, Institutos de Pesquisas e Empresas de Mineração. Tal exigência torna-se cada vez mais frequente quando se vislumbra os enfoques do sensoriamento remoto para a próxima década. Este será caracterizado pelo desenvolvimento paralelo de várias plataformas orbitais de coleta de dados, muitas de grande interesse para a área de geologia e pelo desenvolvimento de metodologias de análise e interpretação desses dados.

5. REFERÊNCIAS-BIBLIOGRÁFICAS

- COLLINS, W.; CHANG, S.H.; RAINES, G.; CANEY, F.; ASHLEY, R. *Airborne biogeochemical mapping of hidden mineral deposits*. Econ. Geol. 78, 737, 1983.
- GOETZ, A. F.H.; VANE, G.; SOLOMON, J.E.; ROCK, B.N.; *Imaging spectrometry for Earth Remote Sensing*. Science, 228 (4704): 1147-1153, 1985.
- OLIVEIRA, M.O.B. *Aquisição e tratamento de dados para um sistema geográfico de informações*. Dissertação de Mestrado. (INPE-4172-TDL/272), 1986.
- NASA (1987), *HIRIS - High Resolution Imaging Spectrometer: Science opportunities for the 1990s*. Earth observing system. vol. Iic. NASA. Instrument Panel Report.

NASA (sd/a). *SAR - Synthetic Aperture Radar*. Earth observing system. vol. Iif. NASA, Instrument Panel Report. 233p.

NASA (sd/b). *From Pattern to process: The strategy of the Earth Observing System*. vol. II. Eos Science Steering Committee Report.

WALKER, K.M. *Digital spatial data handling techniques applied to the development of quantitative geologic models*. Int'l Symposium on Remote Sensing of Environment, 17, Proceedings, vol. 2. p.827-838, 1983.