

APLICABILIDADE DA ANÁLISE AUTOMÁTICA DE IMAGENS LANDSAT À PESQUISA MINERAL
NO INTERFLÚVIO ARAGUAIA-XINGU

G. Amaral

Instituto de Pesquisas Espaciais

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

Caixa Postal 515, 12200 - São José dos Campos, SP, Brasil

Instituto de Geociências

Universidade de São Paulo

Caixa Postal 20899, 01000 - São Paulo, SP, Brasil

RESUMO

O grande volume de trabalhos geológicos, realizados no sudeste do Estado do Pará, na região da Serra dos Carajás, resultou na descoberta de um grande número de ocorrências minerais. O presente trabalho faz parte de uma ampla atividade de pesquisa, cujo objetivo é definir metodologias apropriadas para exploração mineral em regiões tropicais úmidas. Diversos testes foram efetuados sobre os granitos estaníferos da bacia do rio Fresco e sobre os depósitos de ferro, manganês, cobre, níquel, alumínio e ouro da região da serra dos Carajás. Com exceção dos granitos estaníferos e dos depósitos de ferro, as ocorrências minerais da área não apresentam características espectrais que permitam sua discriminação através dos algoritmos disponíveis no sistema I-100. Isto é devido à pequena interação entre a mata amazônica e os produtos de alteração daqueles depósitos. Todavia, muitos desses depósitos estão associados a feições morfológicas e/ou estruturais características, o que permite sua discriminação através da análise visual convencional.

ABSTRACT

The large number of geological works which are being carried out at the Southeastern portion of the Pará State, at the serra dos Carajás region, yielded a large number of mineral discoveries. The present work is part of a larger research activity, whose objective is to define appropriate methodologies for mineral exploration in humid tropical regions. Several tests were conducted on the tin bearing granites of the rio Fresco basin and on the iron, manganese, copper, nickel, aluminium and gold deposits of the Serra dos Carajás area. With exception of the tin granites and iron deposits, the spectral characteristics of the mineral occurrences of the region didn't allow its discrimination with the available software of the Image-100 system. This is due to the weak interaction between the tropical forest and the alteration products of such deposits. However, many of these deposits are associated with characteristic morphological/structural features, which allows its discrimination by conventional visual analysis.

1. INTRODUÇÃO

A descoberta, em meados da década de 60, dos depósitos de ferro e manganês da região da Serra dos Carajás motivou o desenvolvimento de diversos programas de mapeamento geológico, levantamentos geoquímicos e geofísicos, e prospecção mineral. Como consequência disto, essa região é, potencialmente, o distrito mineral mais importante do país. Os imensos depósitos de minérios de ferro, associados a jazimentos de grande porte de manganês, cobre, níquel, alumínio e ouro, constituem-se numa

logia da região é discutida com maiores detalhes em Amaral (1974) e Silva et alii (1974). A localização das ocorrências minerais e a discussão sobre o potencial mineral da região são apresentados em Santos (1981)

A utilização de imagens LANDSAT para a pesquisa mineral constitui-se numa das aplicações mais importantes dessa tecnologia. Com isso em mente e levando-se em conta as dificuldades inerentes ao trabalho geológico na região, o presente programa foi concebido com os seguintes objetivos:

- i) desenvolver metodologias específicas para a prospecção mineral em regiões densamente florestadas e com espesso manto de solo;
- ii) localizar áreas favoráveis à ocorrência de novos depósitos.

É obvio que as metodologias a serem desenvolvidas deverão ser baseadas nas características morfológicas da região e nas características espectrais dos materiais superficiais, dentro dos limites de resolução geométrica e espectral do sistema LANDSAT.

Dois aspectos deverão ser considerados, a saber:

- i) localização direta de depósitos estenos, tais como ferro e bauxita;
- ii) localização de rochas e/ou estruturas favoráveis à ocorrência de depósitos minerais.

O presente trabalho apresenta os resultados obtidos até o momento na região do interflúvio Araguaia-Xingu, os quais abrangem a bacia do rio Fresco e a região da Serra dos Carajás.

Geologicamente, a região é constituída por um embasamento granítico-gnáissico, sobre o qual repousam seqüências de rochas metassedimentares e vulcânicas de menor grau metamórfico, similares àquelas de "greenstone belts". A estas seqüências estão associados os depósitos de ferro, manganês, cobre, alumínio e, possivelmente, níquel e ouro. As rochas metassedimentares formam sinclínórios preenchidos por sedimentos clásticos, aos quais também se associam depósitos de manganês. Na bacia do Xingu, essas rochas são capeadas por derrames de rochas vulcânicas, ácidas a intermediárias, recobertas, por sua vez, por arenitos. Intrusões básicas e graníticas afetam as rochas dessa parte da região estudada. A esses granitos jovens associam-se as mineralizações de estanho (Amaral, 1974).

2. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na região da serra dos Carajás, os depósitos de ferro resultam da lixiviação seletiva de sílica dos itabiritos (Tolbert et alii, 1971). Como decorrência disto, desenvolve-se na superfície uma espessa crosta laterítica (canga), a qual inibe o desenvolvimento da mata tropical. Isto pode ser claramente observado nas imagens LANDSAT, como mostram as Figuras 1 e 2. No canal 5 as áreas de canga aparecem em tonalidade clara, devido à alta reflectância dos solos expostos na faixa de 0.6 - 0.7 μm . A mata tropical apresenta tonalidade

muito escura, devido à baixa reflectância da vegetação naquela faixa espectral. Nota-se na Figura 1 o traçado das estradas existentes na região, desde aquela que liga Marabá a serra do Norte, até as estradas de serviço da Amazônica Mineração. No canal 7 (Figura 2), as áreas de canga apresentam-se com tonalidades escuras, devido à baixa refletividade do conjunto solo-vegetação na faixa de 0.8 - 1.1 μm . As massas d'água apresentam-se com tonalidade quase negra, devido à alta absorvância nessa faixa do espectro, ao passo que a mata exibe tonalidades claras devido à sua alta refletividade. O tom mais claro da imagem realça os efeitos de sombreamento e, conseqüentemente, a morfologia, prestando-se muito bem a estudos estruturais. Muito embora as clareiras associadas ao minério de ferro possam ser delineadas visualmente, é importante sua caracterização espectral mais minuciosa, através da análise dos dados em fitas compatíveis com computador (CCT). Desse modo, será possível a discriminação de situações similares eventualmente fora da resolução visual. Assim sendo, foram desenvolvidos diversos testes utilizando-se as técnicas mais simples do I-100 (single-cell), com excelentes resultados. O tratamento estatístico constituiu na análise dos histogramas para cada canal, baseados em áreas teste nas clareiras N-4 e S-11, em condições de nebulosidade nula a moderada. Os resultados são mostrados na Figura 3, onde as áreas classificadas, em amarelo, são superpostas a uma composição colorida da região.

Os granitos estaníferos da bacia do rio Xingu caracterizam-se pelo alto conteúdo em feldspatos potássicos, principalmente ortoclásio (Abreu et alii, 1974). Como esses feldspatos intemperizam-se mais lentamente, com relação aos plagioclásios e microclínio, esses corpos graníticos apresentam-se com um relevo mais elevado, caracterizado por morros do tipo "pão de açúcar". Com isso, a mata tropical fica restrita às áreas mais baixas. Esta situação apresenta muitas semelhanças com aquela que ocorre nos depósitos de ferro, com os granitos exibindo tons claros no canal 5 e escuros no canal 7. Este canal é o que melhor se presta para estudos geológicos na região amazônica (Amaral, 1974), motivo pelo qual ele foi o selecionado para as ilustrações. A Figura 4 mostra a imagem da região do granito Velho Guilherme, localizado na extremidade oeste da serra dos Carajás. Nota-se o contorno aproximadamente circular, o relevo pronunciado e a tonalidade escura, que caracterizam este tipo litológico. A Figura 5 mostra um granito semelhante, de contornos elípticos, cortado pelo rio Riozinho, afluente do rio Fresco, pela margem esquerda. Um teste de classificação automática foi feito sobre o granito Velho Guilherme, utilizando-se o programa "single cell"; seus resultados são apresenta

dos na Figura 6, com as áreas classificadas em amarelo, sobre a colorida composta. No caso da classificação dos granitos, houve interferência de áreas com maior rarefação na vegetação, tais como pântanos e coberturas arení-

licas. Todavia, estes problemas foram bastante minimizados ao se aplicarem os programas de classificação sobre as imagens obtidas pela divisão dos canais 5/6 e 6/7.

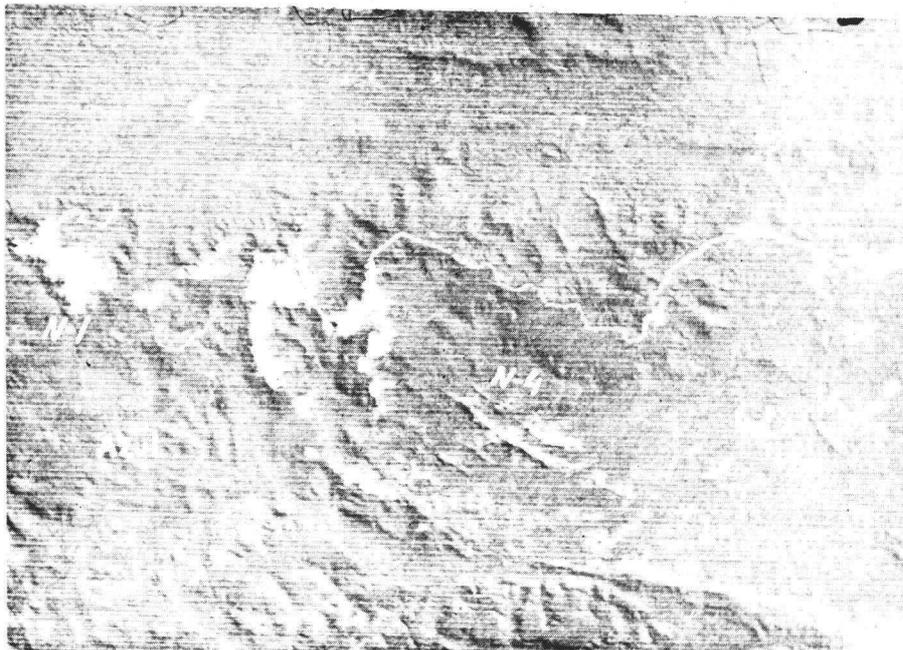


Fig. 1 - Imagem LANDSAT MSS, canal 5, da porção norte da serra dos Carajás. Estão indicadas as clareiras N-1 e N-4, associadas ao minério de ferro e às cabeceiras do igarapé Azul, onde ocorrem depósitos de manganês. Observa-se claramente as estradas de acesso à serra dos Carajás, provenientes de Marabá. A região abrangida pela foto, tem cerca de 53 km de largura.

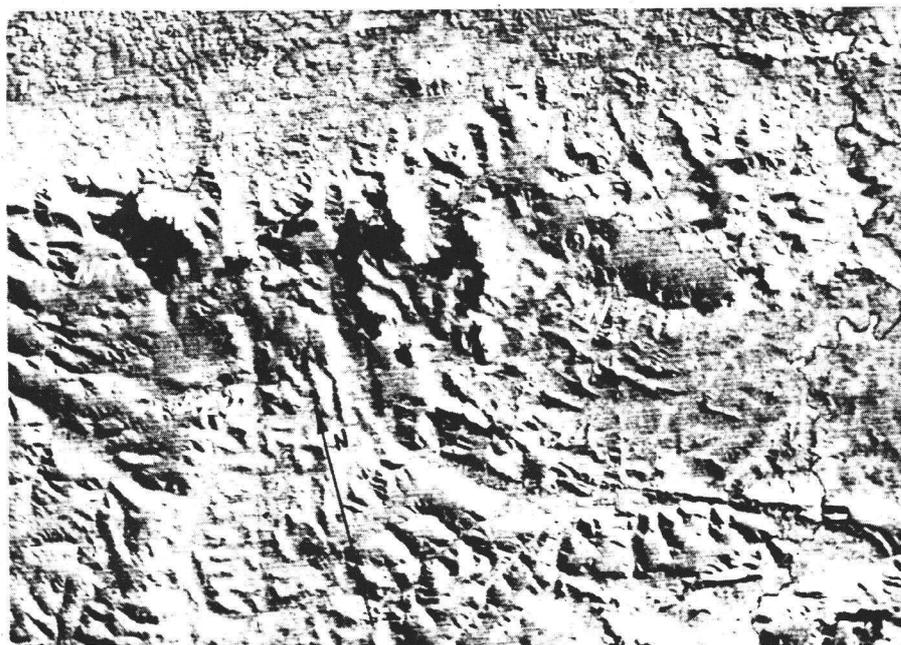


Fig. 2 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da porção norte da serra dos Carajás. Nota-se o realce das feições morfológicas, o tom mais escuro das clareiras associadas ao minério de ferro e o platô bauxitífero a norte da inscrição N-4.



Fig. 3 - Resultados da classificação automática das clareiras associadas ao minério de ferro, em amarelo, sobre a composição colorida da região.

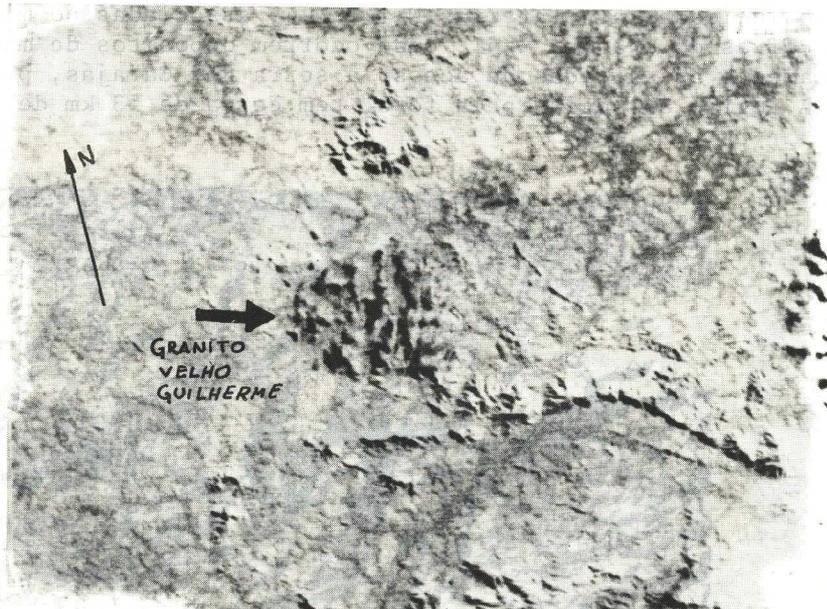


Fig. 4 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, do granito Velho Guilherme.

Notar a tonalidade escura, a forma circular e o relevo acidentado. Esta intrusão tem aproximadamente 7 km de diâmetro.

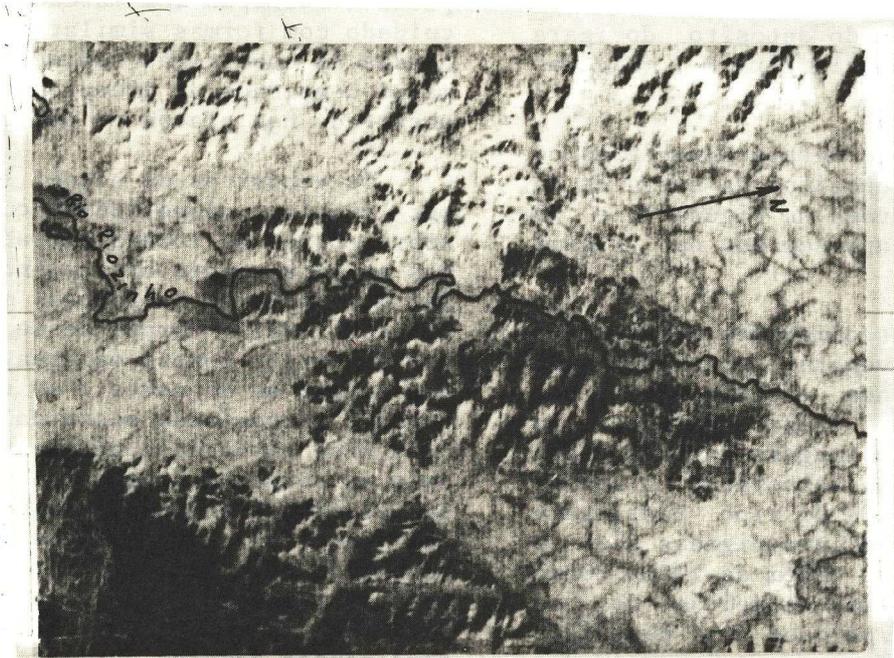


Fig. 5 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, do granito do rio Riozinho, afluente do rio Fresco.

Notar a forma elíptica, a tonalidade escura e o relevo acidentado. A sudeste tem-se coberturas areníticas (Formação Gorotire), a oeste granitos mais sódicos, e as áreas planas com textura maculada são constituídas por rochas vulcânicas da Formação Sobreiro. O corpo granítico tem cerca de 30 km de comprimento, ao longo do seu eixo maior.



Fig. 6 - Resultados da classificação automática do granito Velho Guilherme, em amarelo, sobre a composição colorida.

Com relação ao manganês, ele ocorre em duas situações distintas (Anderson et alii, 1974; Bernadelli e Beisiegel, 1978):

- i) associado ao capeamento sedimentar que preenche o sinclinório da serra dos Carajás, como é o caso do depósito do igarapé Azul, ao sul da clareira N-1 (Figuras 1 e 2).
- ii) associado às rochas metassedimentares, como é o caso dos depósitos da serra de Buritirama, apresentada na Figura 7, e da serra do Sereno, apresentada na Figura 10.

Devido às pequenas dimensões desses depósitos e ao capeamento vegetal, eles não puderam ser identificados nem visualmente, nem com o auxílio do I-100. O único guia para a prospecção, com base em imagens LANDSAT, é seu modo de ocorrência e sua associação litológica. No caso dos depósitos do tipo Buritirama Sereno, as áreas a serem investigadas são relativamente pequenas (da ordem de 1000 x 80 metros), associadas a faixas estreitas de rochas metamórficas. Já no caso dos depósitos do tipo Azul, as áreas a serem investigadas são muito maiores pois atingem 1000 x 1000 m.

Os principais depósitos de cobre da região estão associados a anfibolitos relacionados às seqüências metassedimentares. A mineralização é sulfetada, disseminada nos corpos anfibolíticos (Meyer e Farias, 1980). Os depósitos não exibem características morfológicas e espectrais distintas. O estudo, neste caso, visou detectar possíveis anomalias espectrais na vegetação, tendo em vista que o cobre é um elemento bastante tóxico, capaz de causar "stress". As tentativas de classificação não deram nenhum resultado, e não foi detectada diferença entre os comportamentos espectrais da vegetação sobre o depósito e fora dele. O guia de prospecção são os corpos anfibolíticos que se ressaltam na topografia, como com seqüência de sua maior resistência ao intemperismo. A Figura 8 apresenta a região do igarapé Salobo, onde foram localizados os maiores depósitos de cobre da região (cerca de 4 milhões de toneladas de cobre contido). A ponta da seta indica o alinhamento das serras sustentadas por lentes anfibolíticas. O principal depósito estudado localiza-se na extremidade leste desse conjunto de serras.

Os depósitos de bauxita localizam-se no platô a leste da clareira N-4 e são formados por alteração de rochas básicas associadas às rochas metassedimentares (Assad e Beisiegel, 1978). Observa-se bem este platô nas Figuras 1 e 2, onde a vegetação se apresenta aparentemente com tonalidades mais escuras. Todavia, a análise automática mostrou que a vegetação sobre o platô é indistinguível da vegetação nas áreas planas. Isto se deve ao fato de a

superfície do platô ser muito plana, não ocorrendo efeitos de sombreamento e iluminação solar direta. Deste modo, o guia para a prospecção de depósitos similares são as formas topográficas tabulares, com superfície bastante plana e escarpas bem marcadas. Deve-se tomar cuidado com formas similares que ocorrem associadas às coberturas sedimentares, porém com maior densidade de drenagem, o que pode ser observado nos platôs da porção sul da Figura 2.

Os depósitos de níquel são constituídos por lateritas niquelíferas que se desenvolvem sobre corpos de rochas ultrabásicas, encaixadas no embasamento cristalino nas proximidades dos enclaves de rochas metassedimentares (Santos, 1981). Corpos desse tipo são conhecidos em vários pontos da área. Os mais estudados situam-se ao norte e ao sul da serra Arqueada, extremidade oeste da serra dos Carajás. Essa situação é apresentada na Figura 9, onde os corpos de rochas ultrabásicas sustentam elevações elípticas ao norte (Puma) e ao sul (Onça) da serra Arqueada. Não se obteve resultado significativo durante as tentativas de classificação automática desses corpos, sendo que os resultados obtidos foram muito semelhantes àqueles obtidos para os depósitos de bauxita. Com relação à análise visual, esses corpos mostram forma e feições topográficas características. Eles apresentam formas arredondadas, com alta densidade de drenagem (ravinação) nas bordas. A tonalidade, no canal 7, é geralmente mais escura que a correspondente ao embasamento (Figura 9), devido provavelmente a uma rarefação na cobertura vegetal.

Com a descoberta, no final da década de 70, dos depósitos de ouro nas serras das Andorinhas e Pelada, aumentou o interesse para localizar depósitos similares. Infelizmente, são escassas as informações acerca da situação geológica daquelas ocorrências. Sabe-se que o ouro de serra Pelada está associado a sedimentos pelíticos que preenchem um pequeno sinclinal entre as serras Leste e do Sereno (Santos, 1981), na extremidade oriental da serra dos Carajás (Figura 10). A serra das Andorinhas tem a forma de uma ferradura com a abertura voltada para leste (Figura 11). Ela é constituída por metassedimentos e metavulcânicas, que formam um sinclinal com eixo E-W e caimento para leste. As litologias presentes são muito similares àquelas dos "greenstone belts" da Rodésia, o mesmo acontecendo com as estruturas, o que permite supor origem e idade semelhantes (Cordeiro e Saueressig, 1980). A área mais bem estudada situa-se no extremo leste da aba sul do sinclinal de Andorinhas, onde o ouro nativo ocorre associado a metassilicatos e sulfetos, impregnando siltitos e grauvacas. Os trabalhos de análise automática concentram-se nas tentativas de discriminação litológica. Entretanto, as unidades de interesse têm espessuras muito reduzidas, espé-

cialmente o metassilexito. Além disso, o forte relevo realça os efeitos de iluminação/sombreamento, o que prejudicou as tentativas de classificação. Como guias para seleção de

áreas de interesse, sugere-se delimitação visual das cristas alinhadas, sustentadas principalmente por metassedimentos silicificados.

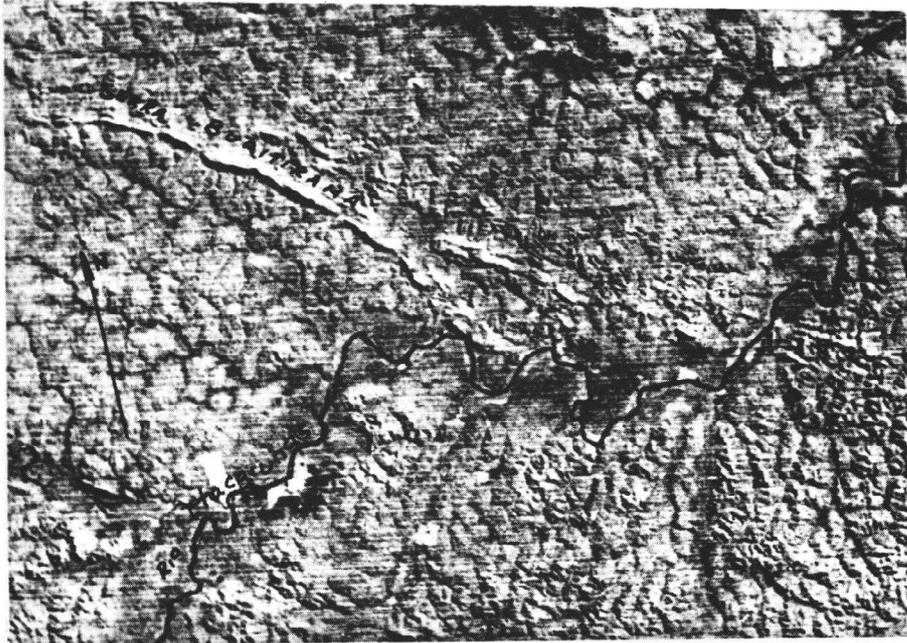


Fig. 7 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da região da serra de Buritirama.

Notar as cristas de rochas metassedimentares (xistos e quartzitos), às quais se associam os depósitos de manganês. A serra de Buritirama tem cerca de 25 km de comprimento.

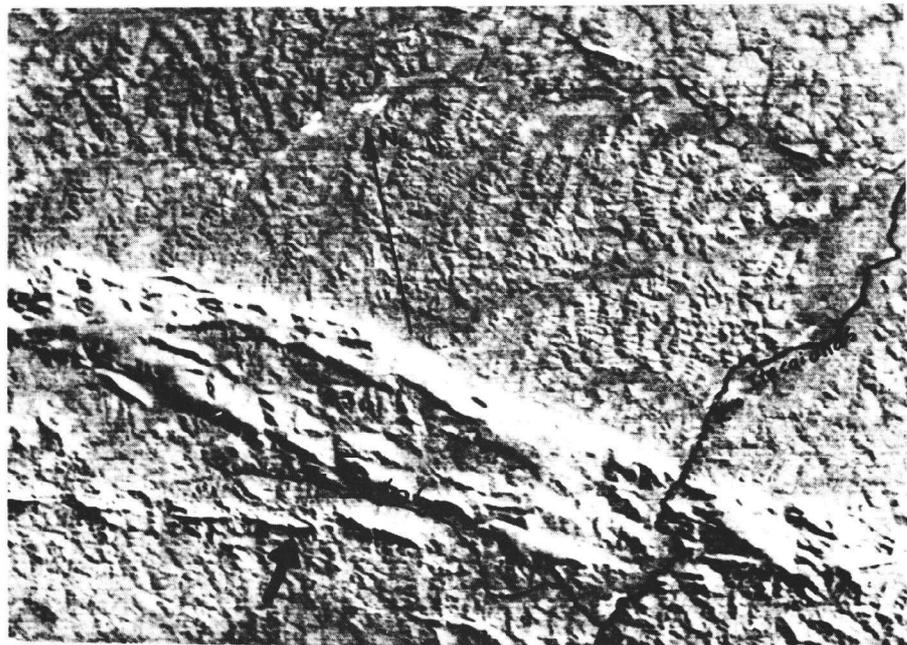


Fig. 8 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da região do igarapé Salobo - serra do Cinzento.

A seta indica as serras sustentadas por anfibolitos mineralizados em cobre. A região abrangida pela foto tem 40 km de largura.



Fig. 9 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da região da serra Arqueada, no extremo oeste da serra dos Carajás.

As setas indicam os maciços ultrabásicos do Puma (ao norte) e Onça (ao sul), associados a mineralizações níquelíferas. A serra Arqueada tem 45 km de comprimento.



Fig. 10 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da região da serra Pelada (nome local para a serra leste).

As cristas alinhadas constituem a serra do Sereno, com depósitos de manganês. O morro da Babilônia, onde se localiza o garimpo de ouro, situa-se entre a serra do Sereno e a serra Leste. Para efeito de escala, a região da foto tem 60 km de largura.



Fig. 11 - Imagem LANDSAT MSS, canal 7, da região da serra das Andorinhas.

Notar a forma em ferradura, aberta para leste, sustentada por rochas metassedimentares silicificadas. Os depósitos de ouro mais bem conhecidos associam-se às serras da extremidade leste da aba sul. O sinclinal das Andorinhas tem 25 km ao longo do seu eixo maior.

3. CONCLUSÕES

A análise visual, baseada principalmente nos canais 5 e 7, é normalmente decisiva, especialmente quando se dispõe de um bom conhecimento prévio da região. A grande vantagem da análise visual é seu baixo custo. Todavia, quando diferenças tonais e texturais muito sutis estão presentes, a análise visual poderá tornar-se muito difícil.

Com relação ao tratamento automático, geralmente os realces e as composições coloridas são suficientes para discriminar determinados alvos, como ocorreu na maior parte dos casos durante este estudo. Tratamentos estatísticos mais sofisticados são limitados a sistemas complexos como o Image-100. No presente estágio desta pesquisa, o tratamento estatístico não conseguiu melhores resultados do que aqueles obtidos com o pré-processamento e as composições coloridas.

Quase uma década de experiência no uso de dados LANDSAT vem demonstrando que eles podem ser de extrema importância para a exploração mineral em regiões tropicais úmidas. (Amorim, 1974, 1976, 1977). Nestas áreas, as rochas são geralmente cobertas por espesso manto de solo, sobre o qual desenvolve-se densa floresta. Deste modo, as diferenças tonais ob-

servadas para a cobertura vegetal poderão estar associadas a "stress" ou a condicionamento geoquímico, além do condicionamento topográfico. Neste fato reside a principal diferença entre as metodologias desenvolvidas para as regiões áridas e semi-áridas, onde o comportamento espectral de minerais e rochas é fundamental para esses estudos.

Os resultados obtidos são bastante promissores, o que permite a recomendação para o uso de abordagens similares, de modo a orientar trabalhos de prospecção na região.

4. AGRADECIMENTOS

O autor expressa seus agradecimentos à Direção do Instituto de Pesquisas Espaciais, à Coordenação do Departamento de Sensoriamento Remoto e à gerência do Programa de Recursos Minerais e Energéticos, pelo contínuo apoio dado a esta atividade. Agradece, ainda, aos colegas do grupo de interpretação automática o auxílio prestado durante o uso do I-100.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, F. de A.M.; RAMOS, C.R. Estanho do sul do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. *Anais*. Porto Alegre, SBG, 1974, v. 6, p. 11-23.

- AMARAL, G. Automatic interpretation of LANDSAT imagery for mineral exploration in the Amazon region Brasil. *Symposium on mineral Exploration of Umid Tropical Regions*. Caracas, 1977. In press.
- AMARAL, G. Estudos sobre a aplicabilidade da interpretação automática de imagens LANDSAT para a prospecção mineral. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 29., Ouro Preto, 1976. *Anais*. Ouro Preto, SBG, 1976, v. 3, p. 191-193.
- AMARAL, G. *Geologia pre-cambriana da região Amazônica*. Tese de Livre-Docência. São Paulo, Instituto de Geociências, USP, 1974. 212 p.
- ANDERSON, W.L.; DYER, R.C.; TORRES, D.D. Ocorrências de manganês na bacia do rio Itacaiunas, centro leste do Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. *Anais*. Porto Alegre, SBG, 1974. v. 6, p. 149-164.
- ASSAD, R.; BEISIEGEL, W. de R. Depósito de bauxita na serra dos Carajás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. *Anais*. Recife, SBG, 1978, v. 4, p. 1385-1391.
- BEISIEGEL, W. de R.; BERNARDELLI, A.L.; DRUMOND, N.F.; RUFF, A.W.; TREMAINE, J.W. Geologia e recursos minerais da serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociência*, 3(4):215-242, 1973.
- BERNADELLI, A.L.; BEISIEGEL, W. de R. Geologia econômica da jazida de manganês do Azul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30., Recife, 1978. *Anais*. Recife, SBG, 1978, v. 4, p. 1431-1444.
- CORDEIRO, A.A.C.; SAUERESSIG, R. Serra das Andorinhas: geologia e principais ocorrências de ouro (Res.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriu, 1980. *Resumos*. Camboriu, SBG, 1980. p. 334. (Boletim N.2).
- MEYER, D.J.K.; FARIAS, N.F. O depósito de cobre Salobo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31., Camboriu, 1980. *Resumos*. Camboriu, SBG, 1980. p. 382. (Boletim N.2).
- SANTOS, B.A. *Amazonia potencialidade mineral e perspectivas de desenvolvimento*. São Paulo, T.A. Queiroz, EDUSP, 1981. 256 p.
- SILVA, G.G. da; LIMA, M.I.C. de; ANDRADE, A. R.F. de; ISSLER, R.S.; GUIMARÃES, G. Geologia. In: Brasil. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto Radam. *Folha SB-22 Araguaia e parte da SC-22 Tocantins*. Rio de Janeiro, 1974. (Levantamento de Recursos Naturais, 4).
- TOLBERT, G.E.; TREMAINE, U.W.; MELCHER, G.C.; GOMES, C.B. The recently discovered serra dos Carajás iron deposits, northern Brasil. *Economic Geology*, 66:985-994, 1971.