

INTEGRAÇÃO DE DADOS AÉREOS GAMAESPECTROMÉTRICOS COM IMAGENS TM-LANDSAT NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO DA ÁREA DO POJUCA, PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

R. R. Dias¹ & W. R. Paradella²

Esta pesquisa enfoca a integração digital de dados aéreo-gamaespectrométricos com dados TM-Landsat no mapeamento geológico da área do Pojuca, Província Mineral de Carajás (Região Amazônica). A área de estudo está relacionada com gnaisses, metassedimentos e metavulcânicas de idade Arqueana e granitos anorogênicos do Proterozóico Médio. A cobertura vegetal é típica de floresta tropical úmida de terra firme. A integração dos dados TM-Landsat e gamaespectrométricos produz produtos realçados, os quais mostram os relacionamentos espaciais entre morfologia do terreno e radioatividade do substrato, que são indicadores valiosos da distribuição de unidades litológicas, estruturas, tipos de rochas e processos de metassomatismo hidrotermal. Apesar da baixa resolução espacial dos dados aéreo-gamaespectrométricos, os produtos integrados gama/TM-Landsat apresentam-se como uma poderosa ferramenta para o mapeamento geológico na área de pesquisa. Os resultados da investigação enfatizam a importância do uso da integração digital de dados baseada em imagens orbitais de sensores remotos e dados aerogeofísicos, como uma rotina no mapeamento sistemático da Região Amazônica, particularmente nas regiões onde dados aerogeofísicos estão disponíveis.

Palavras-Chave: Produtos digitais integrados; TM-Landsat; Gamaespectrométricos; Carajás; Região Amazônica; Sensoriamento Remoto Geológico.

INTEGRATION OF AIRBORNE GAMMASPECTROMETRIC DATA WITH LANDSAT TM IN THE GEOLOGICAL MAPPING OF THE POJUCA AREA, CARAJÁS MINERAL PROVINCE - *This research focuses on the digital integration of airborne gamma ray and Landsat TM data for geological mapping in the Pojuca Area, Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). The study area is related to Archean gneisses, metasediments and metavolcanics, and anorogenic granites with Middle Proterozoic age. The vegetation is typical of tropical upland rain forest. The integration of Landsat TM and gamma ray spectrometric data produces enhanced products which show the spatial relationships between terrain morphology and bedrock radioactivity, valuable indicators of lithological unit distribution, structures, rock types and hydrothermal metasomatism processes. Despite the low spatial resolution of the airborne gamma ray data, the gamma ray/Landsat TM products have provided a powerful investigative tool for geologic mapping in the area. Results of this research emphasize the importance of using digital integration based on orbital remote sensing and aerogeophysical data as a routine in systematic mapping in the Amazon Region, particularly for large areas where airborne geophysical data are available.*

Key words: *Digital integrated products; Landsat TM; Gamma ray; Carajás; Amazon region; Geologic remote sensing.*

¹Sistema Estadual de Planejamento e Meio Ambiente - SEPLAN, Palácio Araguaia, Praça dos Girassóis, 77003-020 Palmas, TO.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, C. P. 515, 12201-970 São José dos Campos, SP.

INTRODUÇÃO

Grandes programas de levantamentos geológicos, geofísicos e radarmétricos têm sido concentrados na Amazônia brasileira nas últimas décadas, cujos dados se encontram, principalmente, em agências governamentais (DNPM, CPRM, PETROBRÁS, entre outras). Contudo, devido à complexidade deste ambiente (densa cobertura vegetal, intenso intemperismo, dificuldades de acesso, poucos afloramentos de rochas, etc.), o conhecimento geológico atual ainda é precário, com grandes áreas mapeadas apenas ao nível de reconhecimento (Berbert, 1989).

Do acervo de dados disponíveis, os de natureza geofísica, recobrando mais de 50% desta região, tem sido comumente utilizados no formato de mapas de contornos (Marinho & Azevedo, 1986; Araújo, 1991; Oliveira, 1994, entre outros). Uma alternativa que tem sido mais recentemente explorada, neste tipo de ambiente, é a transformação destes dados no formato *raster* e sua integração com outros tipos de dados, através de sistemas de processamento digital de imagens e de informações geográficas (Rolim, 1993; Bicho, 1994; Dias, 1994; Martini, 1995; Paradella et al., 1997, entre outros).

A transformação de dados geofísicos em imagens digitais é vantajosa, porque as gradações das respostas geofísicas (radiométricas, magnéticas, gravimétricas, etc.) das rochas são exibidas em níveis de cinza e a acuidade visual humana na interpretação é maximizada quando tais imagens são apresentadas como composições coloridas (Drury & Walker, 1987).

A integração digital de dados de diferentes naturezas não é uma abordagem nova nas Geociências. Ela decorre da tendência natural dos geocientistas de buscar correlações espaciais entre variáveis distintas e da potencialidade do uso da tecnologia computacional como a alternativa mais adequada à análise e à extração de informações, particularmente as de interesse geológico (Aarnisalo, 1984; Gaál, 1988; Harris et al., 1990; Almeida Filho, 1995, entre outros). É neste contexto que este trabalho apresenta os resultados da integração de dados aéreos gamaespectrométricos e imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do satélite Landsat-5, em mapeamento geológico no flanco norte da Serra dos Carajás (Área do Pojuca). A investigação é parte de um programa de pesquisa de longa duração implementado em Carajás, que visa o desenvolvimento e a avaliação de metodologias de extração de informações geológicas, através de sensores remotos, de ambientes de floresta tropical úmida.



Figura 1 - Localização da área de estudo.

Figure 1 - Location on the study area.

ÁREA DE ESTUDO E GEOLOGIA

A área da investigação, com dimensões de 15,3 x 15,3 km, está inserida na parte oriental da Região Amazônica, sudeste do Estado do Pará (Fig. 1). Esta área foi escolhida devido à sua importância econômica (associada com a faixa de mineralizações sulfetadas de Cu-Zn do Igarapé Pojuca), à disponibilidade de dados geológicos em diferentes escalas (regional, semi-detulhe e detalhe) e à existência prévia de um banco de dados digitais georreferenciados (Paradella et al., 1990).

Em termos fisiográficos, a região exibe um relevo heterogêneo. As áreas mais elevadas estão relacionadas à extensos platôs com altitude média de 650 metros. As áreas mais arrasadas são caracterizadas por relevos suaves e colinosos com altitudes médias de 150 a 200 metros. A gradação entre estes extremos, ocorre através de um sistema de serras e vales alongados, segundo a estruturação regional W-NW. De modo geral, os solos são bastante profundos, atingindo até 50 metros na área mineralizada em Cu-Zn (Moura, 1982) e a cobertura vegetal é típica da floresta de terra firme, composta por três formações principais: a Floresta Equatorial Ombrófila Densa, a Floresta Equatorial Ombrófila Aberta e a Floresta Aluvial (Paradella et al., 1994).

Geologicamente, a área de estudo está localizada no Cráton Amazônico e é parte da Província Mineral de Carajás, palco de intensivos programas mais sistemáticos de levantamentos geológicos somente a partir do final da década de 60, com a descoberta dos depósitos de ferro de Carajás (Beisiegel et al., 1973;

Silva et al., 1974; Hirata et al., 1982; DOCEGEO, 1988; Araújo, 1991; Oliveira, 1994, entre outros).

A evolução geológica e tectônica da região apresenta ainda muitas controvérsias e tem permitido diferentes modelos evolutivos, reflexos da complexidade do ambiente e da falta de informações mais consistentes. Assim, Cordani & Brito Neves (1982) e Tassinari et al. (1987), baseados principalmente em datações radiométricas, propuseram um modelo geotectônico com cinturões móveis proterozóicos (composto por rochas gnáissicas, metavulcânicas e metassedimentos) nas bordas de núcleos cratônicos arqueanos com rochas granulíticas e migmatíticas.

Hasui et al. (1984) e Hasui & Haralay (1985), apresentaram um modelo alternativo baseado em dados geológicos e geofísicos. Neste modelo, a estruturação tectônica da região Oriental Amazônica seria constituída por vários blocos crustais arqueanos compostos comumente por granitóides e seqüências metavulcano-sedimentares (tipo *greenstone belts*).

Da integração dos trabalhos regionais e de detalhe da Província Mineral de Carajás, realizados pela CVRD e DOCEGEO (DOCEGEO, 1988), é reconhecido um núcleo granito-*greenstone* envolvido por terrenos granito-gnáissicos. As seqüências tipo *greenstone belt* foram agrupadas no Grupo Andorinhas, enquanto que as faixas de rochas supracrustais, fortemente lenticularizadas, constituiriam o Supergrupo Itacaiúnas (Grupos Grão Pará, Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca, Igarapé Bahia e Buritirama). A esse supergrupo é atribuída uma evolução em ambiente vulcano-sedimentar, de idade arqueana, mas litologicamente distinto das seqüências tipo *greenstone belts*.

Com os mapeamentos regionais posteriores executados principalmente, pela CPRM e UFPa (Araújo et al., 1988; Araújo 1991; Oliveira, 1994; Costa et al., 1994), um novo modelo de evolução geotectônica foi proposto para a região de Carajás. Neste modelo, a área de estudo estaria inserida no Cinturão Itacaiúnas, composto por dois domínios estruturais: o imbricado (sistemas de cavalgamentos oblíquos, com movimentação sinistral e orientação geral E-W) e o transcorrente (sistemas de transcorrência sinistral da Serra dos Carajás e do Cinzento). Ao domínio da Serra dos Carajás foi associada uma megaestruturação em flor positiva.

Na área da pesquisa, as principais fontes de informação geológica são frutos dos mapeamentos e sínteses geológicas conduzidas pela DOCEGEO (1984, 1988) e UFPa (Macambira et al., 1990). Segundo estes autores, as litologias na área seriam representadas pelo Complexo Xingu

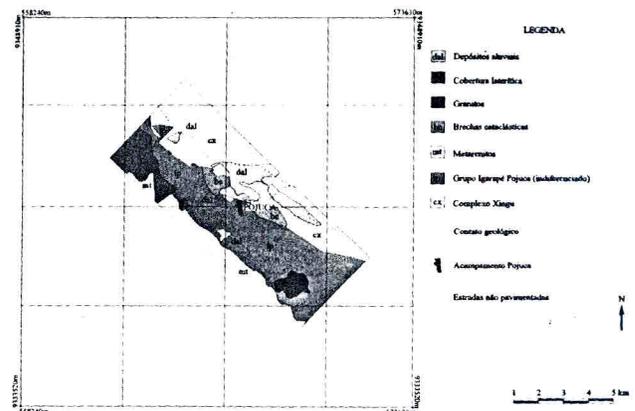


Figura 2 - Mapa litológico da área do Pojuca elaborado por DOCEGEO (1984)

Figure 2 - Lithological map of the Pojuca area done by DOCEGEO (1984).

(gnaisses), Grupo Igarapé Pojuca (metavulcânicas e metassedimentos clasto-químicos), Grupo Rio Fresco ou Formação Igarapé Azul (metassedimentos), Gabro Santa Inês, Granito Itacaiúnas, além de rochas plutônicas básicas mesozóicas (diques de diabásio) e coberturas cenozóicas (lateritas, aluviões e colúvios).

DOCEGEO (1988) caracterizou o Complexo Xingu como constituído por rochas gnáissicas, às vezes migmatizadas, de composições tonalíticas, trondhjemiticas e/ou granodioríticas, tidas como retrabalhamento metamórfico sobre terrenos graníticos arqueanos. Em adição, subdividiu o Grupo Igarapé Pojuca nas Formações Bueno e Corpo 4, relacionadas com seqüências de rochas

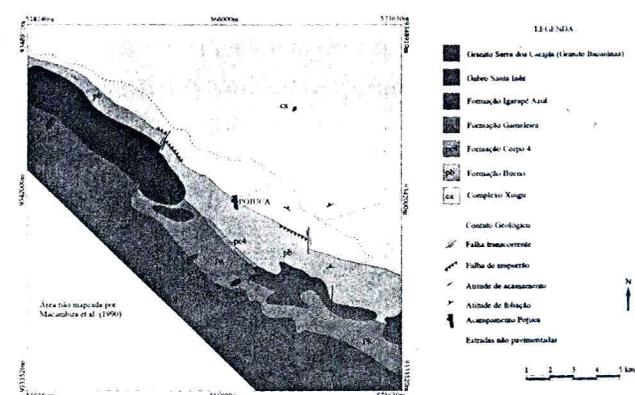


Figura 3 - Mapa litológico da área do Pojuca elaborado por Macambira et al. (1990).

Figure 3 - Lithological map of the Pojuca area done by Macambira et al. (1990).

metavulcânicas básicas e intermediárias alteradas por ação hidrotermal e rochas metassedimentares de composição variada, respectivamente. Finalmente, aos metassedimentos que cobrem grandes extensões na Serra dos Carajás foram atribuídas correlações com litologias do Grupo Rio Fresco (Cunha et al., 1984).

Macambira et al. (1990), nos Projetos Serra Norte e Pojuca, propuseram uma coluna litoestratigráfica alternativa para a área, com subdivisões nos Grupos Grão-Pará e Igarapé Pojuca. No caso do Grupo Igarapé Pojuca foi adicionada, às formações já estabelecidas por DOCEGEO (1988), a Formação Gameleira, composta por metassedimentos (metarenitos e metassiltitos). Estes autores também definiram a Formação Igarapé Azul, composta por rochas metassedimentares sobrejacentes ao Grupo Grão-Pará, e que não teria correlações com as litologias do Grupo Rio Fresco. Além disso, a Formação Igarapé Azul estaria sobreposta ao Grupo Igarapé Pojuca através de inconformidade tectônica. Por último, tais autores cartografaram corpos gabróicos na área, englobados sob a denominação de Gabro Santa Inês e sugeriram o termo Granito Itacaíúnas para o corpo granítico intrusivo nas rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Igarapé Pojuca, na porção ocidental da área de estudo.

Os mapeamentos realizados pela CPRM na Folha Serra Pelada (Oliveira, 1994) cartografaram os gnaisses do Complexo Xingu e concluíram que as rochas metavulcano-sedimentares do Grupo Igarapé Pojuca e os metassedimentos da Formação Igarapé Azul equivalem, respectivamente, ao Grupo Grão-Pará (Formação Parauapebas) e à Formação Águas Claras de Araújo et al. (1988). Ainda neste trabalho foram também individualizados nos domínios do Complexo Xingu, granitóides à duas micas com monzogranitos dominantes e, subordinadamente, granodioritos e sienogranitos, englobados sob a denominação de Granitos Plaquê.

BASE DE DADOS

O seguinte conjunto de dados foi utilizado na investigação: (1) mapas geológicos elaborados pela DOCEGEO (1984) e Macambira et al. (1990), nas escalas de 1:20.000 e 1:40.000, respectivamente; (2) mapas de localização de afloramentos de rochas e de análises petrográficas (total de 119 lâminas descritas) referentes aos trabalhos de Macambira et al. (1990) e Rolim (1993);

(3) imagens digitais TM-Landsat 5 e (4) dados gamaespectrométricos aéreos.

As imagens TM-Landsat 5 (bandas refletidas) pertencem ao banco de dados digitais do Pojuca. A cena de interesse refere-se a órbita/ponto 224/64, quadrante C de 31/05/84, com elevação solar de 46° e azimute de 50°. Esta passagem foi escolhida, a fim de se evitar os efeitos da ação antrópica ligados às atividades de mineração presentes na área teste. As imagens TM-Landsat já se encontravam registradas ao sistema de coordenadas UTM e corrigidas dos efeitos atmosféricos através do método de subtração do *pixel* escuro (*dark pixel subtraction method*) de Chavez Jr. (1975). Maiores detalhes sobre as correções aplicadas às imagens TM-Landsat podem ser encontrados em Paradella et al. (1990).

Os dados gamaespectrométricos aéreos (U e Th em ppm; contagem total em cps e U/Th), sob a forma de *grids* gamaespectrométricos com resolução de 125 m, foram adquiridos junto à CPRM. O canal de potássio (%K) original não foi utilizado porque os arquivos originais apresentavam-se danificados. Em consequência da ausência deste dado ocorreu uma redução no número de produtos a serem gerados (razões K/U, K/Th) que facilitaríamos a detecção de corpos graníticos e de zonas de alteração hidrotermal. As emissões *gama* registradas para os três canais (U, Th e CT) foram coletadas durante o aerolevante geofísico executado pela Northway Survey Corporation Limited (NSCL, 1979). Este aerolevante, referente à Fase II do Projeto Geofísico Brasil-Canadá (PGBC), foi realizado no período de 1975-1976 sob as seguintes especificações: (1) espaçamento de 1 km entre as linhas de voo NS; (2) altura média de voo sobre o terreno de 150 m e (3) intervalo de amostragem ao longo de cada perfil de um segundo. A NSCL efetuou, também, as seguintes operações de processamento dos dados: (1) conversão para o sistema de coordenadas UTM; (2) correções de fundo atmosférico, altitude e efeito Compton; (3) conversão das taxas de contagem do U e Th para concentrações superficiais (ppm) e (4) geração de *grids* gamaespectrométricos com resolução de 625 m com interpolação linear (direção N-S) e *spline* cúbica (direção E-W) e mapas de contornos.

PROCESSAMENTO DOS DADOS

No fluxograma da Fig. 4 são mostradas as fases principais da pesquisa. Elas equivalem às fases de pré-

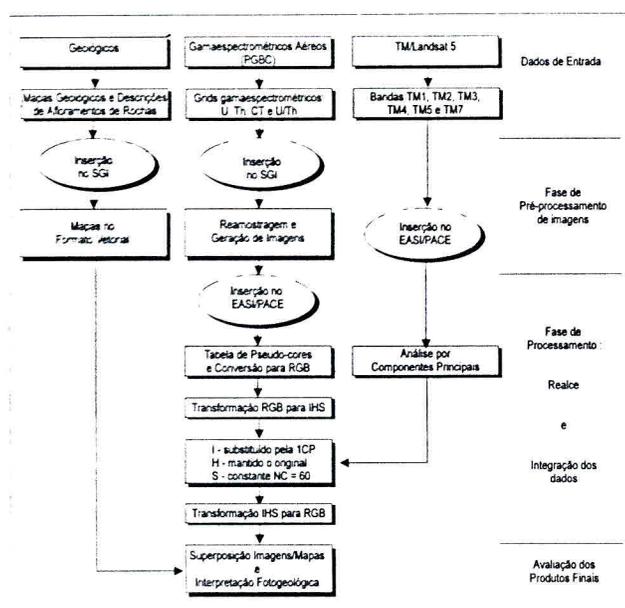


Figura 4 - Fluxograma exibindo as fases principais da integração de dados.

Figure 4 - Flow chart with the main steps in the data integration.

processamento, processamento (realce e integração dos dados) e avaliação final dos produtos obtidos.

A fase de pré-processamento pode ser decomposta nas seguintes etapas: (1) digitalização e georreferenciamento dos mapas geológicos e de localização de afloramentos de rochas e de análises petrográficas, através do *software* SGI/INPE em ambiente PC; (2) análise e manipulação dos dados aéreos *gama* pelo Departamento de Geofísica da CPRM - DIGEOF (Rio de Janeiro) e (3) geração das imagens *gama*. No DIGEOF, após a análise das características intrínsecas dos dados *gama*, efetuou-se a multiplicação dos valores nos canais U e Th originais por um fator 10. Esta operação foi realizada devido à pequena faixa de valores presentes em cada um desses canais e para uma melhor precisão na interpolação para a gridagem de 125 m. Na seqüência, os *grids* de U, Th, CT de 625 metros de espaçamento, gerados pela NSCL, foram reamostrados para 125 m, utilizando-se o *software* BIGRID (GEOSOFT, 1986). Aplicou-se interpolações linear (direção N-S) e *spline* cúbica (direção E-W). A reamostragem dos *grids* seguiu os procedimentos técnicos de geração de malhas geofísicas, filtragens e mapas de contornos estabelecidos por Vasconcellos et al. (1994). Finalmente, os *grids* de 125 m de espaçamento foram importados para o ambiente SGI/INPE (ENGESPAÇO,

1995) e convertidos em imagens gama digitais. Essas imagens, com pixels equivalentes à malha do grid (125 x 125 m) foram reamostradas por convolução cúbica para pixel de 30 x 30 m de modo a equalizá-las com as imagens TM (Harris & Murray, 1989; Harris et al., 1990, 1994; Rolim, 1993). Na conversão dos dados para o formato *raster*, utilizou-se como método de quantização, a equalização linear. Mais detalhes sobre a geração das imagens gama podem ser encontrados em Dias (1994).

Para a fase de processamento, envolvendo o realce e a integração dos dados digitais aéreos gama e TM-Landsat 5, foi utilizado o *software* EASI/PACE da PCI, em ambiente UNIX (PCI, 1995). Como técnica de integração de imagens digitais, escolheu-se a transformação Intensidade, Matiz e Saturação (Intensity, Hue, Saturation - IHS), por ter se mostrado, a mais adequada pela literatura (Harris & Murray, 1989; Harris et al., 1990, 1994; Rolim, 1993; Paradella et al., 1997, entre outros).

Um aspecto importante, que merece ser discutido, refere-se à abordagem seguida na integração. Vários autores (Harris & Murray 1989; Harris et al. 1990; Harris, 1991) têm usado como canais de entrada (*input*) na transformação RGB-IHS os três canais U, Th e K simultaneamente. Neste tipo de esquema, as variações das respostas radiométricas, representadas pelas variações de matiz na composição colorida final, seguem a síntese de combinação de cores do diagrama ternário RGB.

No caso dos dados gamaespectrométricos de Carajás, a não disponibilidade do canal de %K tem mostrado que, apesar de fornecer resultados satisfatórios (Dias 1994, Martini, 1995), a integração IHS gama-TM/Landsat baseada no uso simultâneo dos canais U, Th e CT (diagrama ternário RGB) não evita a redundância inerente no produto final da contribuição do U e Th do canal de contagem total. Além disso, a combinação de cores, resultante da integração de respostas radiométricas provenientes simultaneamente dos três canais U, Th e CT, nem sempre é de fácil interpretação geológica na composição colorida final. Isto ocorre pela complexidade da associação das gradações de matizes com respostas integradas do *background* e de anomalias isoladas de CT, U e Th, que podem representar, geologicamente, fenômenos distintos (respostas de unidades litológicas, de tipos de rochas, de processos de metassomatismo, hidrotermalismo, etc.).

De modo a contornar estes inconvenientes, Paradella et al. (1997) optaram por uma abordagem alternativa que facilitasse a interpretabilidade geológica no produto

integrado final. Neste sentido, tais autores apresentaram um modelo de integração de dados de sensores remotos (radar) e imagens gama, a partir da decomposição de cada canal gama via tabelas de pseudocores. Cada canal é usado, independentemente, como *input* na transformação RGB-IHS. Deste modo, os produtos integrados finais mostram as variações de respostas de U, Th e CT, de modo independente, favorecendo a interpretação do significado geológico das gradações de matizes e sua correlação com variações na topografia.

Assim, considerando as discussões anteriores, promoveu-se a integração dos dados *gama* e TM-Landsat seguindo os passos: (1) geração de tabelas de pseudocores (RGB para cada imagem gama de U, Th, CT e razão U/Th) e conversão para o espaço RGB; (2) aplicação da análise por componentes principais às imagens TM-Landsat e realce linear na primeira componente (imagem ICP a ser usada como realce de relevo); (3) transformação RGB para IHS, utilizando-se os canais obtidos no item 1; (4) substituição dos canais intensidade (I) pela ICP realçada linearmente e saturação (S) por uma imagem com valor constante (nível de cinza = 60) e, manutenção do canal de matiz (H) original, e (5) retorno ao espaço RGB, através da aplicação da transformação inversa IHS para RGB. Deste modo, foram obtidos quatro produtos finais que exibem matizes provenientes de cada um dos canais individuais U, Th, CT e U/Th e variações topográficas (relevo) originadas das imagens TM-Landsat.

Por último, realizou-se a análise visual dos produtos finais através de interpretação fotogeológica e de suas combinações com os dados geológicos no SGI/INPE. De posse dos mapas fotointerpretados foram realizadas verificações de campo. A avaliação final dos dados obtidos, digitalmente integrados, possibilitou a verificação de correlações entre respostas geofísicas, variações de morfologia do relevo, características superficiais (cobertura vegetal) e as informações geológicas disponíveis para a área de estudo (distribuição espacial das unidades litológicas, suas estruturas, descrição de afloramentos de rochas e análises petrográficas).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados todos os produtos finais resultantes da integração dos dados gama e TM-Landsat. No entanto, apenas as imagens IHS combinando os canais CT/TM-

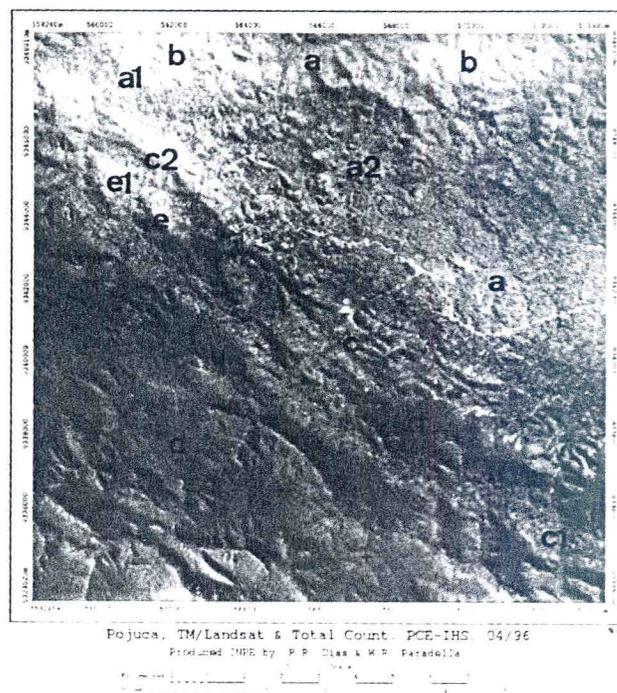


Figura 5 - Imagem composição colorida resultante da integração IHS dos canais gama Contagem Total e TM/Landsat.

Figure 5 - Integrated IHS color composite based on gamma Total Count and Landsat TM.

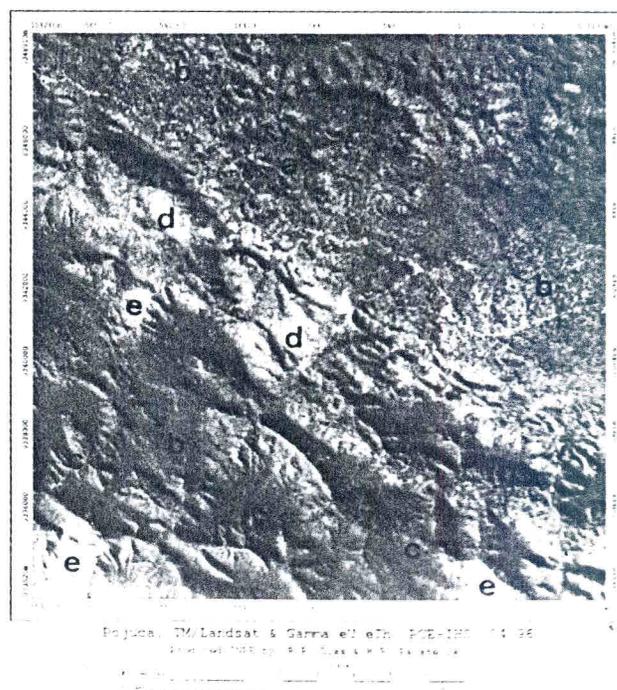


Figura 6 - Imagem composição colorida resultante da integração IHS da razão dos canais eU eTh e TM Landsat.

Figure 6 - Integrated IHS color composite based on gamma ratio U/Th and Landsat TM.

Landsat e razão (U/Th)/TM-Landsat são apresentadas e discutidas neste trabalho (Figs. 5 e 6, respectivamente). Nas composições coloridas, a principal contribuição dos canais *gama* foi o fornecimento das variações de cores ou matizes (anomalias e *background*) ligadas às diferentes respostas radiométricas das rochas, enquanto os dados TM-Landsat contribuíram no realce das diferenças topográficas (elevação e declividade), função da estruturação e resistência das rochas à erosão.

No produto integrado CT/TM-Landsat, os mais baixos valores radiométricos correspondem às matizes de azul, os intermediários às tonalidades de verde, enquanto os mais altos valores equivalem às nuanças de amarelo e vermelho. Nesta composição colorida (Fig. 5), o Complexo Xingu, com topografia baixa e relevos colinosos, com partes planas e serras isoladas, aparece caracterizado por tons de vermelho-amarelado, amarelo e verde. Os mais altos valores radiométricos desse complexo (matizes amarelo e vermelho-amarelado, **a** e **a1** na Fig. 5), são condizentes com as respostas de suas litologias de filiação ácida. Tais respostas são sugestivas da presença de granodioritos e gnaisses graníticos, não cartografados previamente, mas citados por Hirata et al. (1982), DOCEGEO (1988) e Macambira et al. (1990). Por outro lado, as áreas em matiz verde, i. e., áreas dos mais baixos valores radiométricos no domínio do Complexo Xingu (**a2** na Fig. 5), estariam associadas com respostas de gnaisses tonalíticos, enquanto que, as gradações em vermelho ou os mais altos valores radiométricos detectados (**b**) estão espacialmente bem correlacionadas com os granitóides a duas micas, mapeados previamente como Unidade Plaquê pela CPRM (Oliveira, 1994). Estas mesmas variações de respostas radiométricas também foram verificadas nas imagens U/TM-Landsat e Th/TM-Landsat, fortalecendo estas correlações ou correspondências discutidas.

O Grupo Igarapé Pojuca, caracterizado por um relevo de serras alinhadas segundo a direção NW-SE apresenta, de modo geral, um comportamento de valores radiométricos baixos a intermediários. Os tons de azul (**c**) e ciano (**c1**), predominantes, são interpretados como reflexos da composição mineralógica das litologias metavulcano-sedimentares das formações Bueno, Gameleira e Corpo 4. No entanto, parte da Formação Bueno com matiz vermelho (**c2**), localizada no canto superior esquerdo da imagem, aparece com um comportamento radiométrico muito distinto das demais áreas de sua ocorrência. Este mesmo comportamento é verificado nas

imagens U/TM-Landsat e Th/TM-Landsat, podendo ser resultante de enriquecimento supergênico em U e Th (influência do granito Itacaiúnas).

A Formação Igarapé Azul (relevo montanhoso mais elevado da área e com extensos topos planos) aparece, predominantemente, com matizes azul/ciano (**d**), indicativas de baixos valores radiométricos, reflexo em grande parte da sua composição sedimentar. O Granito Itacaiúnas, com formato elíptico e moderada resistência à erosão, é caracterizado por tons de verde-amarelado (**e**) e vermelho-amarelado (**e1**), valores radiométricos intermediários a elevados. As coberturas lateríticas que ocorrem associadas às litologias da Formação Igarapé Azul apresentam-se com baixos valores radiométricos (tons de azul/ciano, **f**).

Em síntese, a análise do produto integrado CT/TM-Landsat permitiu as seguintes constatações: (1) uma boa separabilidade de unidades geológicas, principalmente, entre as litologias do Complexo Xingu e do Grupo Igarapé Pojuca, e do Granito Itacaiúnas e do Grupo Igarapé Pojuca; (2) a individualização de áreas no Complexo Xingu com características de respostas distintas, que devem indicar diferenças composicionais das litologias no complexo e (3) uma excelente definição da distribuição espacial da Unidade Plaquê.

O produto integrado razão (U/Th)/TM-Landsat apresentou a melhor performance média na discriminação litológica na área e permitiu realçar variações composicionais dentro de uma mesma unidade geológica. Nesta imagem (Fig. 6), as diferenças das respostas radiométricas detectadas nos canais U e Th correlacionam-se com os matizes através da relação: azul (**a**) = respostas radiométricas iguais nos dois canais; magenta-azulado (**b**) = maior resposta relativa de tório; e ciano (**c**), amarelo (**d**) e magenta (**e**) = maiores respostas relativas de urânio. O matiz amarelo (**d**) reflete as áreas onde ocorrem os maiores enriquecimentos de urânio em relação ao tório, que podem refletir processos de diferenciação magmática, metassomatismo ou hidrotermalismo.

A partir das variações de matizes descritas acima e associação com variações topográficas, as principais contribuições dessa imagem foram: (1) boa caracterização do Granito Itacaiúnas (comparativamente aos demais produtos), sendo definida uma diferença de comportamento radiométrico no sentido E-W. Conforme sugerido por Macambira et al. (1990), três hipóteses são aventadas para este comportamento: diminuição de feldspato potássico e de pertitas no mesmo

sentido E-W, provável ocorrência de dois corpos granitóides dentro de um mesmo evento intrusivo ou presença de processos hidrotermais ou metassomáticos; (2) individualizações de litologias no domínio da Formação Igarapé Azul correlacionadas as matizes magenta, e magenta-azulado e ciano. Em virtude do pequeno número de descrições petrográficas disponíveis para esta unidade, sugere-se, baseado na literatura sobre comportamento radiométrico de rochas (Galbraith & Saunders, 1983; Matolín, 1984) a seguinte correlação de matizes/litologias: magenta = metarenitos arcoseanos e magenta-azulado e ciano = metarenitos puros; 3) separação entre a Formação Igarapé Azul e o Grupo Igarapé Pojuca e 4) as coberturas lateríticas sobrejacentes às litologias da Formação Igarapé Azul, em geral, contém maiores teores relativos de tório. Cabe ainda salientar que em relação ao Complexo Xingu, as contribuições das imagens: razão (U/Th)/TM-Landsat, CT/TM-Landsat, U/TM-Landsat e Th/TM-Landsat são equivalentes em termos da variação das respostas radiométricas na discriminação litológica.

Os elementos estruturais identificados nos produtos finais da integração dos dados gama e TM/Landsat refletem o comportamento litoestrutural das unidades geológicas da área, estando representado por feições dúcteis preservadas do regime compressivo do Sistema Carajás. No domínio do Complexo Xingu, o comportamento estrutural é essencialmente dúctil, mas devido ao relevo colinoso e bastante arrasado, não foi possível identificar os traços das foliações miloníticas verificadas no trabalho de campo. No entanto, no domínio do Grupo Igarapé Pojuca, ocorre um forte controle estrutural impresso em suas litologias, associado com o relevo de serras e caracterizado por lineamentos estruturais orientados segundo a direção NW-SE, composto por falhas, fraturas e ou foliações. Deve ser destacado que o Grupo Igarapé Pojuca separa-se do Complexo Xingu e Formação Igarapé Azul, através de falhamentos que definem uma zona de cisalhamento dúctil transcorrente sinistral, conforme mapeamentos de Macambira et al. (1990) e Oliveira (1994). Já no domínio da Formação Igarapé Azul, nota-se que seus metassedimentos mostram-se bastante fraturados com *trends* NW-SE, N-S e NNE-SSW, que truncam os lineamentos NW-SE, prováveis traços de foliação e ou acamadamento

O mapa geológico da Fig. 7 representa a interpretação final dos produtos integrados gamaespectrométricos e TM/Landsat dessa investigação. Neste mapa, foram individualizadas os domínios e principais estruturas geológicas (dados pelas variações de matizes integradas

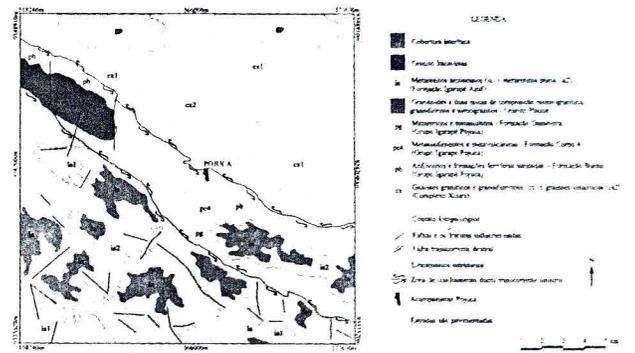


Figura 7 - Mapa fotogeológico resultante da integração final dos produtos integrados gamaespectrométricos e TM/Landsat.

Figure 7 - Photogeological map derived from the final integration of the gamma and Landsat TM distinct products.

com as variações dos atributos de relevo, indicativos de texturas e estruturas).

Foi observado que as respostas radiométricas nos canais de U, Th e CT apresentam razoável correlação com a cobertura vegetal associada com os maiores domínios geológicos na área de estudo. Assim, considerando-se as formações vegetais definidas por Paradella et al. (1994), o domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Densa, associado com litologias da Formação Igarapé Azul/coberturas lateríticas, de modo geral, correlaciona-se espacialmente com respostas radiométricas médias a baixas. O domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Aberta, associada com o Complexo Xingu e Grupo Igarapé Pojuca, está relacionado com respostas radiométricas mais altas. Finalmente, ao domínio da Floresta Aluvial ou de Baixo, associada com o Complexo Xingu, estão associados os mais baixos níveis de radiação, devido à presença de áreas com excesso de umidade e ou com coberturas aluvionares recentes. Deve ser ressaltado que, associada ao granito Itacaiúnas, ocorrem uma vegetação com menor densidade de biomassa e clareiras naturais e respostas radiométricas intermediárias a elevadas.

Desta forma, a investigação também mostrou que as respostas radiométricas estão diretamente relacionadas com a associação geobotânica (rocha/cobertura vegetal) e que as respostas mais baixas (maior atenuação) ocorrem onde há a maior concentração de biomassa. Tal verificação estaria em conformidade com as conclusões gerais de Pereira e Nordemann (1983) que estimam reduções de 40 a 60% nas respostas radiométricas do terreno devido à cobertura vegetal de ambiente de floresta tropical úmida.

sentido E-W, provável ocorrência de dois corpos granitoides dentro de um mesmo evento intrusivo ou presença de processos hidrotermais ou metassomáticos; (2) individualizações de litologias no domínio da Formação Igarapé Azul correlacionadas as matizes magenta, e magenta-azulado e ciano. Em virtude do pequeno número de descrições petrográficas disponíveis para esta unidade, sugere-se, baseado na literatura sobre comportamento radiométrico de rochas (Galbraith & Saunders, 1983; Matolin, 1984) a seguinte correlação de matizes/litologias: magenta = metarenitos arcoseanos e magenta-azulado = ciano = metarenitos puros; 3) separação entre a Formação Igarapé Azul e o Grupo Igarapé-Pojuca e 4) as coberturas lateríticas sobrejacentes às litologias da Formação Igarapé Azul, em geral, contêm maiores teores relativos de tório. Cabe ainda salientar que em relação ao Complexo Xingu, as contribuições das imagens: razão (U/Th)/TM-Landsat, CT/TM-Landsat, U/TM-Landsat e Th/TM-Landsat são equivalentes em termos da variação das respostas radiométricas na discriminação litológica.

Os elementos estruturais identificados nos produtos finais da integração dos dados gama e TM/Landsat refletem o comportamento litoestrutural das unidades geológicas da área, estando representado por feições dúcteis preservadas do regime compressivo do Sistema Carajás. No domínio do Complexo Xingu, o comportamento estrutural é essencialmente dúctil, mas devido ao relevo colinoso e bastante arrasado, não foi possível identificar os traços das foliações miloníticas verificadas no trabalho de campo. No entanto, no domínio do Grupo Igarapé-Pojuca, ocorre um forte controle estrutural impresso em suas litologias, associado com o relevo de serras e caracterizado por lineamentos estruturais orientados segundo a direção NW-SE, composto por falhas, fraturas e ou foliações. Deve ser destacado que o Grupo Igarapé-Pojuca separa-se do Complexo Xingu e Formação Igarapé Azul através de falhamentos que definem uma zona de cisalhamento dúctil transcorrente sinistral conforme mapeamentos de Macambira et al. (1990) e Oliveira (1994). Já no domínio da Formação Igarapé Azul, observa-se que seus metassedimentos mostram-se bastante fraturados com *trends* NW-SE, N-S e NNE-SSW, que truncam os lineamentos NW-SE, prováveis traços de foliação e ou acamadamento.

O mapa geológico da Fig. 7 representa a interpretação final dos produtos integrados gamaespectrométricos e TM/Landsat dessa investigação. Neste mapa foram individualizadas os domínios e principais estruturas geológicas (dados pelas variações de matizes integradas

Revista Brasileira de Geofísica, Vol. 15(1), 1997

Geologia e interpretação S. A. (DOCEGEO), pelo geólogo Ricardo Sadregeig (Distrito de Manaus - Amazônia) pelo suporte aos trabalhos de campo; à Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM/Rio de Janeiro), especialmente do Sr. Athos Ricardo Vasconcelos e Maria Laura V. de Azevedo, pelo auxílio na geração dos grids geofísicos; ao Prof. Joel Buenano Macambira da Universidade Federal do Pará, que gentilmente forneceu os dados de campo do Projeto Serra Norte-Pojuca e ao Dr. Daniel Nordemann (INPE), pelas valiosas discussões, que em muito enriqueceram a investigação. Um agradecimento especial é devido aos colegas geólogos Dr. Athos Ribeiro dos Santos, Dr. Chan Chiang Liu, Dr. Paulo Veneziani e MSc. Pedro Alberto Bignelli (INPE), pelo acompanhamento nos trabalhos de campo em Carajás. Os autores também agradam às críticas, comentários e sugestões de F. J. de Azevedo e suas respostas radiométricas nos canais de U, Th e CT apresentam razoável correlação com a cobertura vegetal associada com os maiores domínios geológicos na área de estudo. Assim, considerando-se as formações vegetais definidas por Paradella et al. (1994), o domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Densa, associado com litologias da Formação Igarapé Azul/coberturas lateríticas, de modo geral, correlaciona-se espacialmente com respostas radiométricas médias a baixas. O domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Aberta, associada com o Complexo Xingu e Grupo Igarapé-Pojuca, está relacionado com respostas radiométricas mais altas. Finalmente, no domínio da Floresta Aluvial ou de Baixo, associada com o Complexo Xingu, estão associados os mais baixos níveis de radiação, devido à presença de áreas com excesso de umidade e ou com coberturas aluvionares recentes. Deve ser ressaltado que, associada ao granito Itacaiúnas, ocorre uma vegetação com menor densidade de biomassa e clareiras naturais e respostas radiométricas intermediárias a elevadas. Desta forma, a investigação também mostrou que as respostas radiométricas estão diretamente relacionadas com a associação geobotânica (rocha/cobertura vegetal) e que as respostas mais baixas (maior elevação) ocorrem onde há a maior concentração de biomassa. Tal verificação estaria em conformidade com as conclusões de Pereira e Nordemann (1983) que estimam reduções de 40 a 60% nas respostas radiométricas do terreno devido à cobertura vegetal, do ambiente de floresta tropical úmida.

Figura 7 - Mapa fotogeológico resultante da integração final dos produtos integrados gamaespectrométricos e TM/Landsat.

Figura 7 - Photogeological map derived from the final integration of the gamma and Landsat TM distinct products.

REFERÊNCIAS

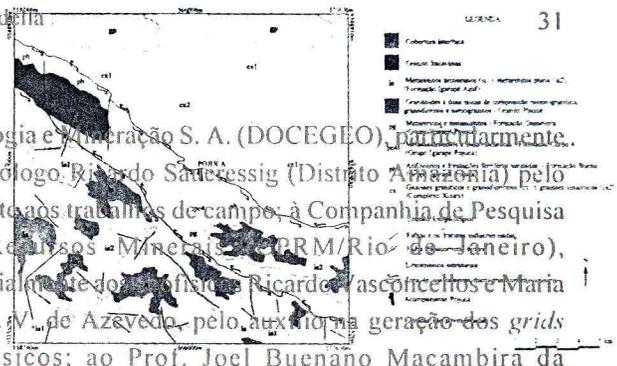
AARNISALO, J. - 1984 - *Image processing and interpretation of Landsat TM and TM-1 data as a tool for mineral exploration in the Precambrian terrain. The Finnish Conference on Remote Sensing*, Espoo, Finland, 1984, p. 10-17.

ALMEIDA FILHO, J. - 1984 - *Mapa geológico e análise espacial de dados de prospecção mineral, através de modelos empíricos de prospecção. Um estudo no planalto de Brasília*. *Boletim da Associação Brasileira de Geofísica*, 13(12): 127-142.

ARAÚJO, O. S. B. - 1991 - *Programa de Evoluções Geológicas Baseadas em Dados de Satélites*. *Cadernos de Geologia*, 19, Estado do Rio de Janeiro, DNPR-CPRM, 30p.

ARAÚJO, O. S. B., MIAO, R. G. N., STEVENS, J. O. & COSTA, J. P. - 1994 - *Avaliação geológica e ambiental da zona de Carajás*. *Atas do Congresso Brasileiro de Geologia*, 1994, 10(1): 1-10.

BEISCHKE, V. G. R., BARRON, D. J. & TREMAINE, J. W. - 1973 - *Geologia e recursos minerais da Serra dos Carajás*. *Revista Brasileira de Geologia*, 3(4): 215-242.



sentido B.W. provável ocorrência de dois corpos granitoides dentro de um mesmo evento intrusivo ou presença de processos hidrotermais, ou metassomáticos; (2) individualizações de litologias no domínio da Formação Igarapé Azul correlacionadas as mázies magenta e magenta azulado e ciano. Em virtude do pequeno número de descrições petrográficas disponíveis para esta unidade, sugere-se, baseado na literatura sobre comportamento radiométrico de rochas (Galbraith & Saunders, 1983; Matoin, 1984), a seguinte correlação de mázies litológicas K magenta = megarenitos arcoseanos e magenta azulado e ciano = metarenitos puros; (3) separação entre a Formação Igarapé Azul e o Grupo Igarapé Pojuca e (4) as coberturas lateríticas sobrejacentes às litologias da Formação Igarapé Azul, em geral, contém maiores teores relativos de fósforo. Cabe ainda salientar que em relação ao Complexo Xingú, as contribuições das imagens razão U/Th/TM Landsat, Th/TM Landsat, U/TM Landsat, e Th/TM Landsat são equivalentes em termos da variação das respostas radiométricas na discriminação litológica. The

Os elementos estruturais identificados nos produtos finais da integração dos dados gama e TM Landsat refletem o comportamento litoe estrutural das unidades geológicas da área, estando representado por feições ducteis preservadas do regime compressivo do Sistema Carajás. No âmbito do Complexo Xingú, o comportamento e estrutura é essencialmente ductil, mas devido ao alevamento bastante arrasado, não foi possível identificar traços de foliações miloníticas verificadas no trabalho de campo. No entanto, no domínio do Grupo Igarapé Pojuca, é evidente a forte estruturação impressa em suas litologias associada com o relevo densamente caracterizado por lineamentos estruturais orientados segundo a direção NW-SE, composto por falhas, fraturas e ou foliações. Deve ser destacado que o Grupo Igarapé Pojuca separa-se do Complexo Xingú e Formação Igarapé Azul, através dos falhamentos que definem uma zona de cisalhamento dúctil transcorrente sinistral (BA Formigão) em apêndices de Macambira et al. S (1990) e Oliveira (1994). Já no domínio da Formação Igarapé Mizura nota-se a que 1984 s-metassedimentos mostram-se bastante fraturados com traços NW-SE, N-S, NNE-SSW, que truncam os lineamentos NW-SE, prováveis traços de delimitação ou sacanamento revisão

O mapa geológico da Fig. 7 representa a interpretação final dos produtos integrados gama espectrométricos e TM Landsat dessa investigação. Neste mapa, foram individualizadas nos domínios de principais estruturas geológicas, dados pelas variações de mázies integradas

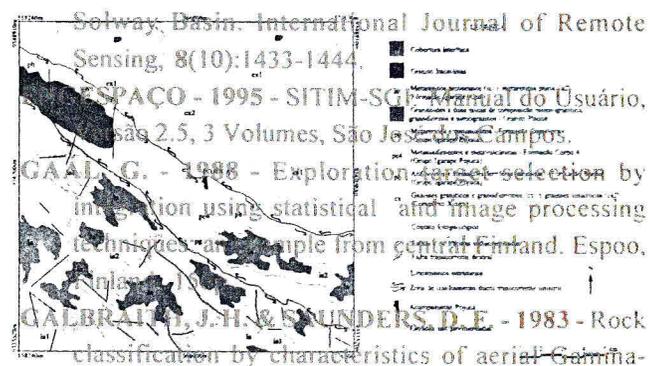


Figura 7. Mapa fotogeológico resultante da integração final dos produtos integrados gamaespectrométricos e TM Landsat.

GAAL, G. - 1988 - Exploration target selection by image fusion using statistical and image processing techniques: an example from central Finland. Espoo, Finland, 1988, 110 pp.

GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA - 1983 - Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray spectrometry. Ottawa, Canada, 1983, 110 pp.

GEOLOGICAL SURVEY OF CANADA - 1988 - The geophysical and geochemical data, 1988, 110 pp.

HARRIS, J.R. - 1991 - Mapping of regional structure with variations of the attributes of relief, indicating textures and structures for regional tectonics and gold

Foi observado que as respostas radiométricas nos canais de U, Th e CT6 apresentam razoável correlação com a cobertura vegetal associada com os maiores domínios geológicos na área de estudo. Assim, considerando as formações vegetais definidas por Paradella Ser et al. (1994), no domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Densa, associado com litologias da Formação Igarapé Azul e ciano lateríticas, de modo geral, correlaciona-se especialmente com respostas radiométricas médias e baixas. O domínio da Floresta Equatorial Ombrófila Aberta, associada com o Complexo Xingú e Grupo Igarapé Pojuca, está relacionada com respostas radiométricas mais altas. Finalmente, no domínio da Floresta Aluvial ou de Baixo, associada com o Complexo Xingú, estão associados os mais baixos níveis de radiação, devido à presença de áreas com excesso de umidade e ou com coberturas aluvionares recentes. Deve ser ressaltado que, associada ao Granito Itacaiúnis, ocorrem unidades geológicas com menor densidade de biomassa secundária e respostas radiométricas intermediárias e elevadas, modelo

Desta forma, a investigação também demonstrou que as respostas radiométricas estão diretamente relacionadas com a associação geobotânica (rocha/cobertura vegetal) e que as respostas mais baixas (maior atenuação no decorrer da formação de há a maior concentração de biomassa) T14 Sierificação de estaria em conformidade com as conclusões gerais de Pereira & Nordemann (1983) que estimam índices de K0, a 60% das respostas radiométricas da Floresta de alta cobertura vegetal de ambiente de floresta tropical úmida

- Carajás. In: Anais I Simpósio de Geologia da Amazônia.1,100-110, Belém.
- MACAMBIRA, J.B., RAMOS, J.F.F., ASSIS, J.F.P. & FIGUEIRAS, A.J.M. - 1990** - Projetos Serra Norte e Pojuca. Relatório final. Convênio DNPM/DOCEGEO UFFA, Belém.
- MARINHO, F.A.V. & AZEVEDO, M.L.V. DE - 1986** - Interpretação geológica dos dados aeromagnéticos e aeroradiométricos - Área Carajás - Folha SB.22-Z-A-II. Anais XXXIV Congresso Brasileiro de Geologia.6.2467-2479, Goiânia.
- MARTINI, J.M.- 1995** - Análise integrada de dados aplicada ao estudo metalogenético da Serra dos Carajás - PA. IG UNICAMP, Dissertação de Mestrado, Campinas.
- MATOLIN, M. - 1984** - Radiometric Methods and Methods of Nuclear Geophysics. In: Stanislav Mares - Introduction to Applied Geophysics, Dordrecht, Holland, D. Riedel Publishing Co., p. 154-231.
- MOURA, C.A.V. - 1982** - Tratamento estatístico de dados geoquímicos e sua aplicação ao mapeamento geológico e definição de anomalias geoquímicas no alvo 2 - corpo 4, Província Mineral de Carajás. UFFA, Dissertação de Mestrado, Belém.
- NSCL (Northway Survey Company Limited)- 1979** - Report to the DNPM-MME (Brazil) on the general magnetic and radiometric survey of the PGBC. Projeto Geofísico Brasil-Canadá. Rio de Janeiro, DNPM.
- OLIVEIRA, J.R. de - 1994** - Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: Folha Serra Pelada (Folha SB.22-Z-A). Estado do Pará. Brasília, DNPM/CPRM, 248p.
- PARADELLA, W.R., KUSHIGBOR, C.A. & FABBRI, A.G. - 1990** - Um banco de dados digitais para exploração na faixa mineralizada em Cu-Zn do Pojuca (Carajás), baseado em dados geológicos, geoquímicos, de sensores remotos e de elevação. Anais VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto.3. 649-662, Manaus.
- PARADELLA, W.R., SILVA, M.F.F.DA, ROSA, N. DE A. & KUSHIGBOR, C.A. - 1994** - A geobotanical approach to the tropical rain forest environment of Carajás Mineral Province (Amazon Region, Brazil) based on digital TM-Landsat and DEM data. International Journal of Remote Sensing, **15**:1633-1648.
- PARADELLA, W. R., VENEZIANI, P., BIGNELLI, P. A., PIETSCH, R. W. & TOUTIN, T. - 1997** - Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. International Journal of Remote Sensing (artigo em impressão).
- PCI - 1995** - Easi-Pace Software, Versão 6.0, Richmond, Canadá.
- PEREIRA, E. B & NORDEMANN, D. J. R. - 1983** - The effects of a Tropical Rain Forest Cover on Airborne Gamma-Ray Spectrometry. Revista Brasileira de Geofísica:**1**(2): 99-108.
- ROLIM, S.B.A. - 1993** - Avaliação do Uso da Transformação IHS na Integração de dados Geofísicos (Aeromagnetometria) e de Sensoriamento Remoto (TM-Landsat) para a investigação geológica na área do Pojuca (Serra dos Carajás, PA). INPE, Dissertação de Mestrado. São José dos Campos.
- SILVA, G.G., LIMA, M.I.C., ANDRADE, A.R.F., ISSLER, R.S. & GUIMARÃES, G. - 1974** - Geologia: Folha SB.22 Araguaia e parte da Folha SC.22 Tocantins. Projeto RADAM (Levantamento de Recursos Naturais), 4, DNPM, Rio de Janeiro.
- TASSINARI, C.G.C., TEIXEIRA, W., SIGA, O., KAWASHITA, K. & CORDANI, U. G. - 1987** - Geological Evolution and Evaluation of Recent Geochronological Data in Amazonian Craton. Final Meeting of the Working Group-Project 204, IUGS-UNESCO/DNPM, p.20-31, Carajás.
- VASCONCELOS, R. M.; METELO, M. J.; MOTTA, A. C.; GOMES, R. D. - 1994** - Geofísica em Levantamentos Geológicos no Brasil.CPRM, Rio de Janeiro.

Submetido em: 23/08/96

Revisado pelo(s) autor(es) em: 17/02/97

Aceito em : 20/04/97