



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5263-TDI/441

**ANÁLISE E INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOLÓGICOS,
TM/LANDSAT-5 E AEROFÍSICOS DA REGIÃO DE IRAJAÍ (PE) –
NE DO BRASIL: UMA ABORDAGEM VISANDO APLICAÇÕES
NO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E NA
PROSPECÇÃO MINERAL**

Sebastião Milton Pinheiro da Silva

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto e Aplicações, orientada pelo
Dr. Paulo Veneziani, aprovada em fevereiro de 1991

INPE
São José dos Campos
1991

528.711.7

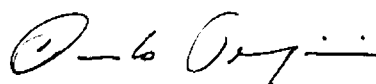
SILVA, S.M.P. da

Análise e integração de dados geológicos,
TM/Landsat-5 e aerogeofísicos da região de Irajá
(PE) - NE do Brasil: uma abordagem visando aplica-
ções no mapeamento geológico e na prospecção mine-
ral. / S.M.P. da Silva. -- São José dos Campos:
INPE, 1991. 174p. --
(INPE-5263-TDI/441)

1. Sensoriamento Remoto. 2. Mapeamento Geolôgi-
co. 3. Integração de Dados. 4. Geofísica. 5. Pro-
cessamento Digital de Imagens. 6. Sistemas de In-
formações Geográficas. I. Título

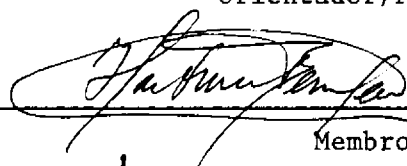
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
em Sensoriamento Remoto

Dr. Paulo Veneziani



Orientador/Presidente

Dr. Hartmut Beurlen



Membro da Banca
-convidado-

Dr. Célio Eustáquio dos Anjos



Membro da Banca

Dr. Athos Ribeiro dos Santos



Membro da Banca

Candidato: Sebastião Milton Pinheiro da Silva

São José dos Campos, 27 de fevereiro de 1991

INTEGRATED EXPLORATION

"True integrated exploration does not begin at some late stage in an exploration program after a geophysical or geochemical (or some other) survey has been completed. The full benefits can only be obtained when integration is effected at the earliest stage of the program. At this time the geologist should raise all the possible geological questions...."

Coope, J.A. e Davidson, M.J., 1979

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

aos meus pais Waldemar e Cidinha, pelo amor,
pelos ensinamentos e pela compreensão de sempre;

**à minha esposa Fátima e aos meus filhos Gus-
tavo, Guilherme e Waldemar Neto** pelo amor, pelo apoio e pe-
las horas ausentes;

**aos meus primos Florivan, Dida, Carolina e
Felipe** pelo amor e incentivo nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Ao realizar este estudo consigno meus agradecimentos às pessoas e instituições que contribuíram para a sua execução.

Ao geólogo, Dr. Paulo Veneziani que me aceitou como orientando e que sempre se dispôs a discutir, através do diálogo franco e aberto, as diferentes idéias aqui abordadas.

Aos geólogos, Hermes Augusto Verner Inda, Diretor de Geologia e Recursos Hídricos e Dr. Ricardo Jorge Lobo Maranhão, ex-superintendente regional da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais- CPRM, cujo empenho na execução do programa de treinamento de recursos humanos desta empresa garantiu a nossa liberação para a realização do curso.

Aos geólogos, João de Castro Mascarenhas Superintendente regional da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e Marinho Alves da Silva Filho, Gerente de Recursos Minerais, pelo apoio dado durante a realização do curso e do trabalho ora apresentado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) que colocou sua infra-estrutura à minha disposição para realização deste trabalho.

Aos professores e companheiros de curso pelo estimulante convívio e apoio que sempre dedicaram.

Aos meus tios José Everaldo de Melo Pinheiro e Carmem Lúcia Guimarães Pinheiro pelo apoio e amizade sempre presentes.

Aos engenheiros do Departamento de Processamento de Imagens (DPI) do Instituto de Pesquisas Espaciais-INPE, em especial a Carlos Alberto Felgueiras, José Guaraci Erthal, Fernando Mitsuo Ii e Virgínia Ragoni de Moraes Correia, pelo auxílio na reformulação e implementação de algoritmos para este estudo.

Aos funcionários do Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais (LTID) e da biblioteca do INPE pela atenção e apoio dispensados.

Aos companheiros da CPRM, em especial aos geólogos-geofísicos Ricardo Moacyr de Vasconcelos e Roberto Gusmão de Oliveira, geólogos Helton Héleri Falcão Torres e Marinho Alves da Silva Filho, pelas críticas e sugestões apontadas, e ao geólogo Adeilson Alves Wanderley pelos dados fornecidos e pelo apoio e acompanhamento nos trabalhos de campo.

Aos desenhistas do INPE, Joaquim Godoy Filho e Silvio Pereira Coimbra, e da CPRM, Francisco de Assis Moraes Batista e Alan Dionísio de Barros, pelos desenhos e gravuras aqui apresentados.

Agradeço ao companheiro geólogo Claudio Scheid e a Sra. Neusa Maria Dias Bicudo pela revisão do texto.

Ao Departamento Nacional da Produção Mineral (DNPM), e a Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) pelo apoio e pelos dados fornecidos.

RESUMO

Este trabalho aborda a análise e integração de dados geológicos, TM/Landsat-5 e aerogeofísicos realizada com o objetivo de avaliar a possibilidade de contribuição adicional e aperfeiçoar uma metodologia voltada para aplicações no mapeamento geológico e na prospecção mineral em regiões semi-áridas como a do Nordeste do Brasil. Foram utilizados dados geológicos de campo, as variáveis eU , eTh , $\%k$, canal da contagem total e a razão eU/eTh dos dados aerogamaespectrométricos, dados aeromagnéticos de campo magnético total e as imagens componentes principais das bandas TM/Landsat-5. Os dados foram geometricamente corrigidos e registrados. Os dados aerogeofísicos, armazenados em fita magnética e mapas de contorno, foram colocados no formato "raster" e mostrados na forma de imagens de níveis de cinza, de composições coloridas e de relevo sombreado ou superpostos com as imagens TM/Landsat-5 realçadas por transformação de componentes principais para que se pudesse analisar, mostrar, avaliar e correlacionar a informação disponível. Na correlação e interpretação dos dados, foram sistematicamente empregadas análises visual e digital através das técnicas de ampliação linear de contraste, transformação por componentes principais padronizadas e composições coloridas RGB, visando extrair o máximo de informação de todos os produtos. O manuseio de todos os dados como imagens permitiu obter mais informações geológicas que os métodos tradicionais de interpretação geológico-geofísica e coleta de dados no campo. Forneceu uma melhor representação da correlação geológica-geofísica e de anomalias e unidades litológicas previamente cartografadas na área. Informações geológicas adicionais foram mostradas neste estudo através da cartografia de um corpo rochoso granítico e de um outro básico; da individualização de subunidades litológicas do embasamento (Complexo Gnaíssico-Migmatítico) e da redefinição do contato entre este Complexo e as rochas metavulcano-sedimentares (Complexo Irajá) da área investigada.

ANALYSIS AND INTEGRATION OF GEOLOGICAL, TM/LANDSAT 5 AND
GEOPHYSICAL DATA FOR GEOLOGICAL MAPPING AND MINERAL
PROSPECTING IN THE IRAJAÍ AREA (NORTHEAST BRAZIL)

ABSTRACT

In the present study geological, TM/Landsat-5 and geophysical data were analysed and integrated to assess their contribution to the improvement of methodologies for geological mapping and mineral prospecting in semiarid terrain, such as the Brazilian Northeast region. The following data were analysed: geological ground-based; airborne gamma-ray spectrometric (eU, %K, eTh, total intensity channels and ratio eU/eTh); aeromagnetic total field and principal component images derived from digital processing of TM/Landsat-5 data. The geophysical data stored in magnetic tapes and contour lines were converted from vector to raster format and displayed as black and white or color images and shaded relief. Those outputs were registered with geometrically corrected Landsat images. The information content of both data set was correlated and assessed by overlaying the geophysical data derived images with digitally processed TM/Landsat images. The images were submitted to the following digital enhancement techniques before being manually and visually analysed: contrast stretch, standardized PCA and RGB color composites. This type of images data manipulation provided more geological information than those derived from conventional methods for geological mapping. They gave a better assessment of existing geological-geophysical correlations, anomalies and lithological units previously documented in the area. More geological information derived from this study was added to the knowledge of the studied area, by locating one more granitic body and a shallowly buried basic intrusion; redefining the contact between the metavolcanic-sedimentary rocks of the Irajá Complex and gneisses and migmatitic rocks of the Gneissic-Migmatitic Complex and mapping lithological subunits in this Complex in the investigated area.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS.....	xix
LISTA DE TABELAS.....	xxiii
 <u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	 1
1.1 - Apresentação e objetivos.....	1
 <u>CAPÍTULO 2 - A ÁREA DE ESTUDO</u>	 7
2.1 - Localização e vias de acesso.....	7
2.2 - Clima e aspectos fisiográficos.....	10
2.3 - Geologia Regional/Trabalhos Anteriores.....	12
2.4 - Recursos Minerais.....	19
 <u>CAPÍTULO 3 - CONCEITUAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS E SISTEMAS UTILIZADOS</u>	 23
3.1 - Dados multiespectrais.....	23
3.1.1 - Dados multiespectrais utilizados.....	27
3.2 - Dados aerogeofísicos.....	29
3.2.1 - Dados magnetométricos.....	29
3.2.2 - Dados gamaespectrométricos.....	32
3.2.3 - Dados aerogeofísicos utilizados.....	37
3.3 - Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).....	39
3.4 - Panorâmica sobre a integração de dados em Geolo <u>g</u> gia.....	45
 <u>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA DE TRABALHO</u>	 51
4.1 - Seleção dos dados.....	51
4.2 - Obtenção do mapa fotogeológico.....	54

4.3 - Obtenção das imagens TM/Landsat-5 realçadas através do processamento digital de imagens....	56
4.3.1 - Atenuação atmosférica.....	57
4.3.2 - Correção radiométrica.....	58
4.3.3 - Transformação por componentes principais.....	59
4.3.4 - Composições coloridas RGB.....	63
4.4 - Compatibilização dos dados.....	65
4.4.1 - Registro das imagens TM/Landsat-5.....	65
4.4.2 - Transformação dos dados geofísicos em imagens.....	70
4.5 - Análise, integração e correlação dos dados.....	77
4.6 - Trabalho de campo.....	77
 <u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</u>	 79
5.1 - Mapa fotogeológico.....	79
5.1.1 - Unidade A.....	79
5.1.2 - Unidade B.....	82
5.1.3 - Unidade C.....	86
5.1.4 - Unidade D.....	87
5.1.5 - Unidade E.....	88
5.1.6 - Estrutura e Deformações.....	90
5.2 - Caracterização geofísica e correlação geológico-geofísica.....	92
5.2.1 - Caracterização magnetométrica.....	92
5.2.2 - Caracterização gamaespectrométrica e os indicadores metalogenéticos potenciais.....	98
5.3 - Integração e análise simultânea das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.....	109
5.3.1 - Análise das imagens componentes principais TM/Landsat-5.....	109
5.3.2 - Análise das imagens componentes principais TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.....	117
5.4 - Síntese dos resultados.....	127

<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	135
APÊNDICE A - MAPA GEOLÓGICO FOTOINTERPRETADO.....	151

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	9
2.2 - Vista das Serras Cariris Velhos e Mulungu a partir do pediplano geral da área de estudo. Visada NW-SE.....	11
2.3 - Esboço dos elementos geológicos principais da província Borborema.....	13
2.4 - Domínios geológicos da província Borborema....	14
2.5 - Mapa geológico simplificado.....	20
3.1 - Elementos da fase de aquisição e a trajetória da radiação eletromagnética (REM) na atmosfera	25
3.2 - Variação da resolução espacial de dados aeromagnéticos em função do aumento da altitude de vôo.....	32
3.3 - Resolução espacial estimada de dados gamaespectrométricos em função da altitude do detector.....	36
3.4 - Porcentagens de cobertura do terreno de dados gamaespectrométricos em função do espaçamento das linhas de vôo.....	37
3.5 - Conceito de "overlays" ou planos de informação (PIs) em um sistema de informações geográficas.....	41
3.6 - Representações de dados do tipo vetorial e varredura "raster".....	42
4.1 - Fluxograma geral do trabalho.....	53
4.2 - Representação hipotética da transformação por componentes principais.....	60
4.3 - O cubo de cores RGB.....	64
4.4 - Definição do sistema de coordenadas cartesianas e dos pares de pontos de controle para implementação do registro de imagem.....	66
4.5 - Amostras de pontos 3D.....	71

4.6 - Modelo de grade gerado a partir dos dados de raios gama relativos ao canal de contagem total. Resolução espacial 250 x 250 metros. Visada SW-NE.....	75
5.1 - Fotografia do mapa de serviço que mostra os elementos de fotoanálise e fotointerpretação obtidos das imagens fotográficas TM/Landsat-5.	80
5.2 - Imagem digital de níveis de cinza obtida dos dados de campo magnético total e respectivo mapa de interpretação.....	94
5.3 - Imagem de campo magnético total que mostra a textura e o relevo dos dados. Visada sul-norte	97
5.4 - Perfil do campo magnético total, calculado e observado em seção transversal ao granitóide da região de Duas Barras.....	98
5.5 - Composição colorida eU R - K G - eTh B das imagens obtidas dos dados gamaespectrométricos com o respectivo mapa de interpretação....	100
5.6 - Imagem digital de níveis de cinza da razão eU/eTh.	104
5.7 - Porcentagens de contribuições de cada banda TM/Landsat-5 para cada novo eixo componente principal.....	113
5.8 - Primeira imagem componente principal (NC1), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.....	114
5.9 - Segunda imagem componente principal (NC2), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.....	115
5.10 - Terceira imagem componente principal (NC3), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.....	116
5.11 - Porcentagens de contribuições de cada banda ou canal individual para cada novo eixo componente principal.....	120
5.12 - Imagens componentes principais (C1, C2 e C3), obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.....	121

5.13 -	Imagens componentes principais (C4, C5 e C6) de mais alta ordem, obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.....	122
5.14 -	Composição colorida das imagens componentes principais MC3 R - MC2 G - MC1 B, obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas..	125
5.15 -	Composição colorida das imagens componentes principais MC5 R - MC4 G - MC6 B de mais alta ordem obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.....	126

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Resumo de nomenclaturas estratigráficas propostas que abrangem a área de estudo.....	18
3.1 - Principais características e aplicações potenciais das bandas "TM" do satélite Landsat-5....	28
3.2 - Valores de susceptibilidade magnética de alguns minerais e rochas.....	31
3.3 - Conteúdo de K, U e Th em diferentes classes de rochas magmáticas e em alguns tipos de rochas metamórficas.....	34
4.1 - Alguns elementos de fotoanálise e o seu significado geológico associado nas imagens.....	55
4.2 - Parâmetros estatísticos das imagens TM/Landsat-5 com diferentes resoluções espaciais..	68
4.3 - Relatório do registro de imagens.....	70
5.1 - Características das unidades fotogeológicas individualizadas na área de estudo.....	85
5.2 - Características geofísicas das litologias da área de estudos.....	108
5.3 - Resultados estatísticos da transformação por componentes principais das seis bandas do TM...	111
5.4 - Resultados estatísticos da transformação por componentes principais das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas	118

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - APRESENTAÇÃO E OBJETIVOS

Embora possua grandes reservas minerais, tais como ferro, estanho, cobre e alumínio, o Brasil é um País que detém um nível de conhecimento geológico do seu subsolo muito baixo, e, conseqüentemente, um potencial em recursos minerais ainda pouco conhecido quando comparado com outros países como Canadá, Estados Unidos e França.

Para o período compreendido entre 1970 e 1980, os números indicam que esse conhecimento se traduzia em 32,8% do território brasileiro, mapeado em escala de 1:250.000; 4,4% em escala de 1:100.000 e 2% em escala de 1:50.000 (CPRM, 1984). Considerando somente a escala de 1:100.000, o incremento em área mapeada no período 1981-1985 foi de apenas 0,62% do território. Mesmo que tenha havido, nos últimos anos, considerável aumento no volume da cartografia geológica básica executada, sabe-se que este foi aquém do necessário.

Para reverter tal quadro é imprescindível a execução ininterrupta dos serviços de mapeamento geológico, através do aporte sistemático e constante de recursos financeiros, dentro de um ritmo de execução desejável, para que se possa realizar novas descobertas e dinamizar os setores de exploração e produção mineral brasileiro.

O mapeamento geológico é executado mediante trabalhos de fotointerpretação geológica e da observação e coleta de dados no campo, dentro de uma rotina na qual, pouco se utilizam, ou pelo menos não-sistematicamente, os recursos mais modernos da informática para interpretação de

dados.

Os dados aerogeofísicos e geoquímicos, obtidos por métodos de coleta e distribuição diferentes, são, via de regra, tratados e analisados de modo isolado para, numa fase posterior, serem comparados e integrados através de perfis, de diagramas de blocos e da superposição de "overlays" de mapas diversos. Quem trabalha com a cartografia de recursos naturais conhece a dificuldade de reunir e sintetizar a informação de muitos mapas. A tarefa quase sempre é demorada e, sem dúvida, restringe o acompanhamento e a visualização da distribuição e das relações espaciais dos dados na forma dos produtos utilizados. Além disto, os diferentes sensores medem e registram diferentes propriedades físicas (eletromagnéticas, campo de força) dos materiais da superfície e da subsuperfície do terreno e, por isso, nem sempre a análise de um único grupo de dados permitirá inferir ou melhor caracterizar o material da superfície medida.

A economia de tempo e de recursos financeiros obtidas com o uso de produtos e técnicas de sensoriamento remoto (aéreo e orbital) na geologia é, de há muito, conhecida e bem documentada pelo emprego das fotografias aéreas, pelos métodos aerogeofísicos e, no Brasil nos últimos 20 anos, pelas imagens multiespectrais de sensoriamento remoto orbital.

As imagens multiespectrais de sensoriamento remoto constituem uma fonte adicional de informações geológicas, podendo agilizar e revelar subsídios valiosos para a execução do mapeamento geológico e para a prospecção mineral. Estas imagens reúnem, como características mais favoráveis, a cobertura sinótica que facilita a visualização regional das estruturas geológicas e os dados multiespectrais, que podem ser processados e interpretados com o ob-

jetivo de extrair o significado geológico do dado registrado pelo sensor nas regiões do espectro eletromagnético, do visível e do infravermelho refletido. Se a este potencial somam-se as informações dos dados aerogeofísicos, é possível admitir que melhores resultados podem ser alcançados a partir do manuseio, da análise e da integração de todos esses dados. Ocorre, porém, que os dados aerogeofísicos não são obtidos como imagens e a sua utilização na forma destes produtos requer transformações pertinentes em ambientes computacionais destinados para tal finalidade.

Foi a partir do desenvolvimento de tecnologias e sistemas computacionais de custo relativamente baixo para aplicações gráficas e de tratamento de imagens de sensoriamento remoto que se verificou uma rápida mudança quanto à forma de apresentação e de interpretação de dados espacialmente distribuídos. Tal mudança envolve a representação de dados no formato de imagens digitais com uma estrutura matricial semelhante à das imagens multiespectrais de sensoriamento remoto, tornando possível explorar os atributos espaciais de relevo e textura dos dados e aplicar técnicas de processamento digital para melhoria, realce e extração das informações geradas pelos diferentes grupos de dados.

Em função da retomada dos serviços de mapeamento geológico e da possibilidade de utilização de recursos auxiliares fornecidos pela informática, abriram-se novos campos de pesquisa de tecnologias e métodos de tratamento e interpretação de dados espacialmente referenciados. Constatou-se a necessidade de ordenar esses recursos para avaliá-los e investigar se, a partir do geoprocessamento e da integração de dados de sensores remotos no formato de imagens de níveis de cinza, é possível obter mais informações geológico-geofísicas, enriquecer os mapas fotointerpretados e, conseqüentemente, aprimorar a carta

geológica preliminar de uma região, antes da etapa operacional de campo de um projeto desta natureza. Com tal perspectiva, houve motivação para propor e conduzir este trabalho, além de estabelecer uma rotina de emprego nos trabalhos de mapeamento geológico e de prospecção mineral.

Diante do exposto, os objetivos do estudo são:

1) Objetivo Geral:

Avaliar a contribuição que a tecnologia de geoprocessamento e integração de dados pode fornecer para os trabalhos de mapeamento geológico e de prospecção mineral, procurando a sistematização de seu uso nestes trabalhos em regiões semi-áridas como a do Nordeste do Brasil.

2) Objetivos Específicos:

a) individualizar e cartografar unidades litológicas/litoestratigráficas e estruturas geológicas através da fotointerpretação de imagens fotográficas e digitais do sistema TM/Landsat-5 (Thematic Mapper);

b) gerar imagens digitais de níveis de cinza a partir de dados magnetométricos e gamaespectrométricos, e avaliar sua utilidade para a cartografia geológica, como imagens individuais e como composições coloridas RGB (Red-Green-Blue);

c) testar as possibilidades de inferir variações faciológicas em rochas granitóides, e delimitar zonas ou sítios de importância metalogenética através dos dados multiespectrais, aeromagnetométricos e gamaespectrométricos;

d) avaliar as inter-relações entre os dados das imagens TM/Landsat-5 realçadas e os dados gamaespectrométricos no formato de imagens, utilizando as técnicas de transformação por componentes principais e de composições coloridas RGB.

De um modo geral, buscou-se desenvolver critérios e/ou aperfeiçoar métodos e técnicas já existentes de interpretação de dados de sensores remotos que contribuam efetivamente para o mapeamento, para a prospecção e para os trabalhos de reavaliação e reinterpretação de áreas anteriormente mapeadas. A importância relativa dos parâmetros e das técnicas utilizadas e os relacionamentos existentes entre os dados também foram analisados.

Finalmente, entende-se que o uso de métodos indiretos para aquisição e interpretação mais detalhada de dados é de fundamental importância na economicidade e na eficácia do mapeamento e nas aplicações da geologia em geral. Portanto, há necessidade de pesquisa e desenvolvimento do sensoriamento remoto, de cuja utilização rotineira deverão resultar estes principais benefícios.

CAPÍTULO 2

A ÁREA DE ESTUDO

2.1 - LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área de estudo está situada na região fisiográfica do alto Sertão do Pajeú, na porção centro-norte do Estado de Pernambuco e centro-sul da Paraíba, região limítrofe dos Estados de Pernambuco e Paraíba, no Nordeste do Brasil. Está limitada, aproximadamente, pelas coordenadas geográficas de $7^{\circ} 45' 00''$ e $8^{\circ} 00' 00''$ de latitude sul e $37^{\circ} 15' 00''$ e $37^{\circ} 30' 00''$ de longitude oeste de Greenwich (Figura 2.1). Possui uma superfície de cerca de 800 km^2 , compreendendo parte da bacia hidrográfica do rio Pajeú (alto curso).

O acesso à área pode ser feito a partir de Recife percorrendo 250 km pela rodovia pavimentada (BR-232) rumo norte até a cidade de Cruzeiro do Nordeste e dali, por estrada asfaltada (BR-110) rumo norte, que passa por Sertânia e Albuquerque Nê, percorrendo mais 70 km até o povoado de Jabitacá, localizado dentro da área de estudo.

Os motivos que levaram à escolha desta área foram:

1) características litológico-estruturais diversificadas, que compreendem litotipos metavulcano-plutônico-sedimentares de composição mineralógica variada e arcabouço estrutural complexo;

2) disponibilidade de mapas e de dados geológicos de campo do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB), do Departamento Nacional da Produção Mineral-DNPM, obtidos pela equipe de mapeamento geológico

da Superintendência Regional de Recife da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM, referentes à Folha SB-24-Z-D-IV, Monteiro (Wanderley, 1990). Os dados foram usados como referência na avaliação e interpretação dos resultados obtidos;

3) disponibilidade de produtos de sensoriamento remoto orbital e dados de aerolevantamento magnetométrico e gamaespectrométrico.

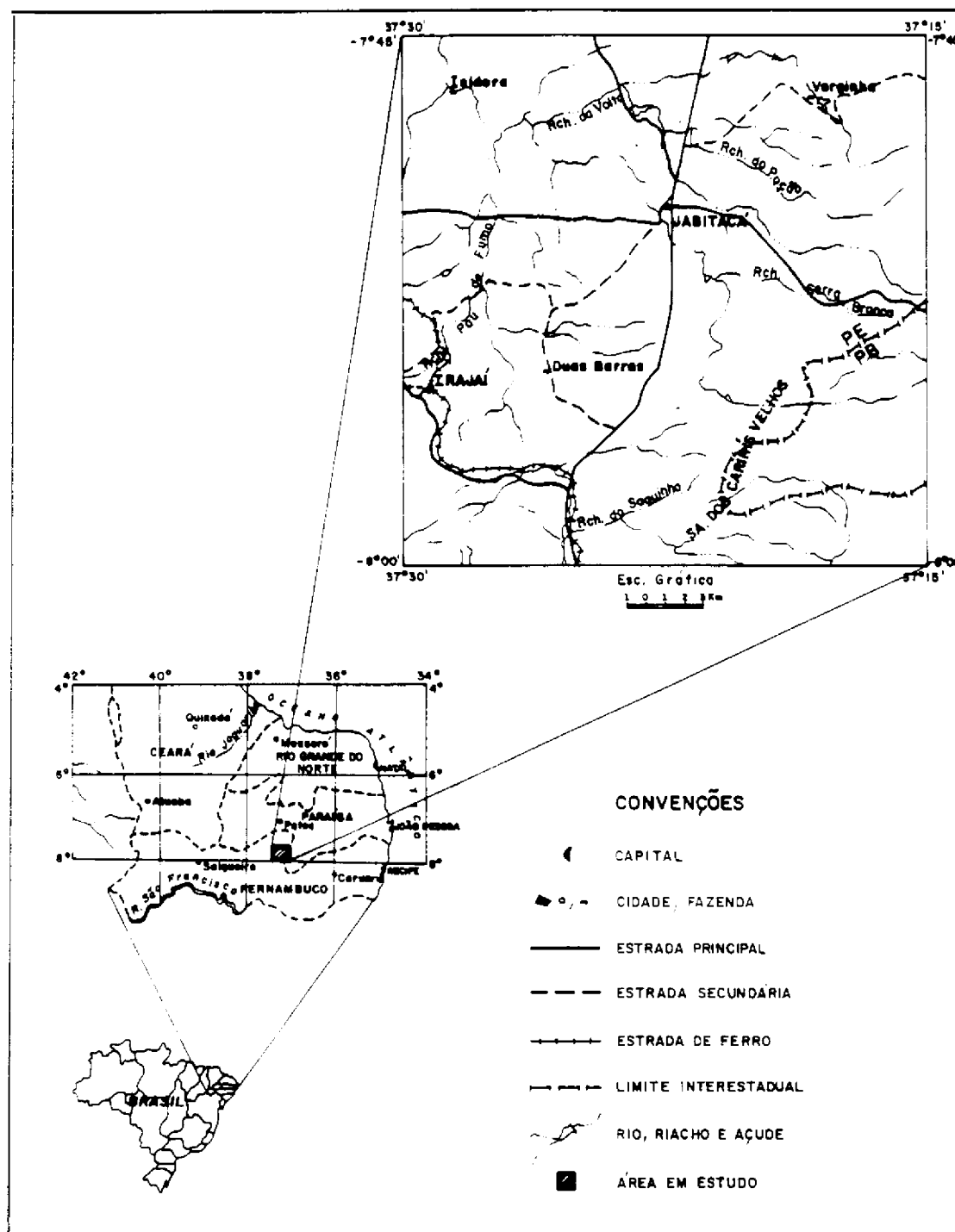


Fig. 2.1 - Mapa de localização da área de estudo.

2.2 - CLIMA E ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

O clima nessa região é quente, semi-árido, com pequenos períodos de chuvas sazonais do tipo Bsh, segundo a classificação de Köppen. As temperaturas dificilmente são inferiores a 24⁰C. A precipitação é escassa e mal distribuída, sendo os meses mais chuvosos fevereiro, março e abril; os mais secos agosto, setembro e outubro. A estiagem não raro prolonga-se por vários meses. A precipitação média anual situa-se em torno de 500 mm (Albuquerque, 1970).

O relevo da área é bastante variado. Toda porção central e noroeste é ocupada por extenso pediplano ondulado, com cotas que variam entre um mínimo de 600 metros nas vizinhanças de Jabitacá, em franco contraste com a superfície cimeira das serras dos Cariris Velhos e Mulungu, com 1080 metros de altitude, delimitadas por escarpas relativamente abruptas, em sua porção sudeste, Figura 2.2.

As serras dos Cariris Velhos e Mulungu marcam o interflúvio das mais importantes bacias hidrográficas da região, que são as dos rios Pajeú e Paraíba. O rio Pajeú atinge o pediplano e dirige-se para sudoeste até confluir com o rio São Francisco; forma, com seus afluentes, um padrão de drenagem subparalelo, possuindo um canal meândrico, intercalado por trechos retilíneos e um leito predominantemente arenoso. O rio Paraíba nasce no flanco leste da serra dos Cariris Velhos, dirige-se para NE-E até atingir o pediplano costeiro e desembocar no Oceano Atlântico, na altura da cidade de João Pessoa, Estado da Paraíba.

De acordo com Projeto RADAMBRASIL (1981), na área predominam diferentes associações de solos Bruno Não-Cálcicos, com textura médio-argilosa, fase pedregosa; solos Litólicos Eutróficos e Distróficos de pequena espessura,

com textura arenosa e média, fase pedregosa e rochosa, sendo comuns em relevo ondulado e fortemente ondulado a montanhoso, além de solos Podzólico Vermelho-Amarelo Eutrófico, com nítida diferença entre os horizontes A, B e C, com textura média/argilosa e média/cascalhenta, em relevo suave ondulado e plano.



Fig. 2.2 - Vista das serras Cariris Velhos e Mulungu a partir do pediplano geral da área de estudo. Visada NW-SE.

Toda gama de variação da vegetação é caracterizada pelo fenômeno de xerofilismo, típica da região de estepe (caatinga). A cobertura vegetal predominante é dos tipos arbórea densa, arbórea aberta e arbórea arbustiva, seguida pela de agricultura cíclica do milho, feijão e algodão nas margens de riachos e nas encostas serranas.

2.3 - GEOLOGIA REGIONAL/TRABALHOS ANTERIORES

De um modo geral, o conhecimento geológico desta porção do Estado de Pernambuco consiste, essencialmente, em estudos de reconhecimento que descrevem aspectos litoestratigráficos regionais (Barbosa, 1965; Ferreira e Albuquerque 1969; Albuquerque, 1970; Santos, 1971, 1977; Dantas, 1980), ou em revisões que englobam toda a região Nordeste (Brito Neves 1973, 1975, 1983; Almeida et al., 1977; Jardim de Sá, 1984; Santos et al., 1984). Estudos mais detalhados foram realizados pelos graduandos em Geologia da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE (Souza, 1972; Figueiras, 1972) e, mais recentemente, através de trabalhos sistemáticos de mapeamento geológico do convênio DNPM/CPRM (Wanderley, 1990; Veiga Junior, 1990).

No contexto geotectônico do Nordeste Oriental, a área de estudo está situada na porção centro-norte do Sistema de Dobramentos Pajeú-Paraíba (Brito Neves, 1975, 1983), dentro da "zona transversal" (Ebert, 1964), ou "zona móvel transversal" (Mello et al., 1977), Figura 2.3.

O Sistema de Dobramentos Pajeú-Paraíba tem a forma geométrica ovalar alongada com cerca de 450 km de extensão e 135 km de largura na sua parte média. Estende-se na direção aproximadamente NE-SW, desde a cidade de Floresta (PE) onde ocorre o limite sul com o maciço Pernambuco-Alagoas, através do Lineamento Pernambuco, até a zona costeira, próximo do litoral de Pernambuco e da Paraíba. O limite norte se faz com o Sistema Seridó, através do Maciço de Teixeira e do Lineamento Patos (PB), ao sul da cidade homônima, situada a 100 km ao norte da área de estudos.

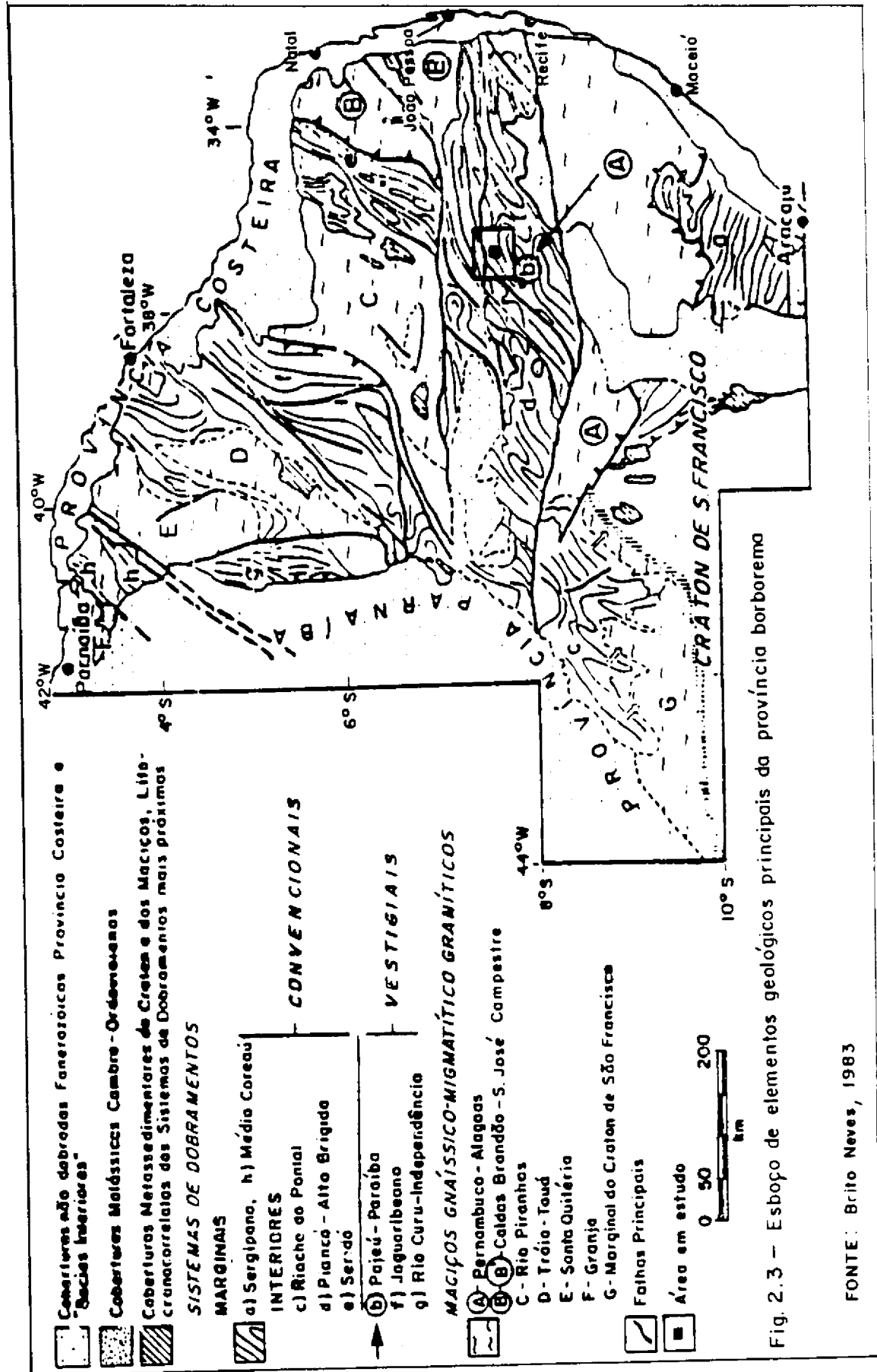


Fig. 2.3 - Esboço de elementos geológicos principais da província borborema

FONTE: Brito Neves, 1983

Segundo Brito Neves (1983) este sistema de dobramentos, juntamente com os maciços gnáissico-migmatítico-graníticos Caldas Brandão-São José do Campestre (ao norte) e Pernambuco-Alagoas (ao sul), define o Domínio Centro-Oriental, equivalente ao Domínio Extremo-Nordeste (Santos et al., 1984), da região de dobramentos Nordeste (Brito Neves, 1975), ou Província Borborema (Almeida et al., 1977) de reconhecida mobilidade tectono-termal no Ciclo Brasileiro, cujos limites são dados pelas Províncias São Francisco, Parnaíba e bacias costeiras, Figura 2.4.

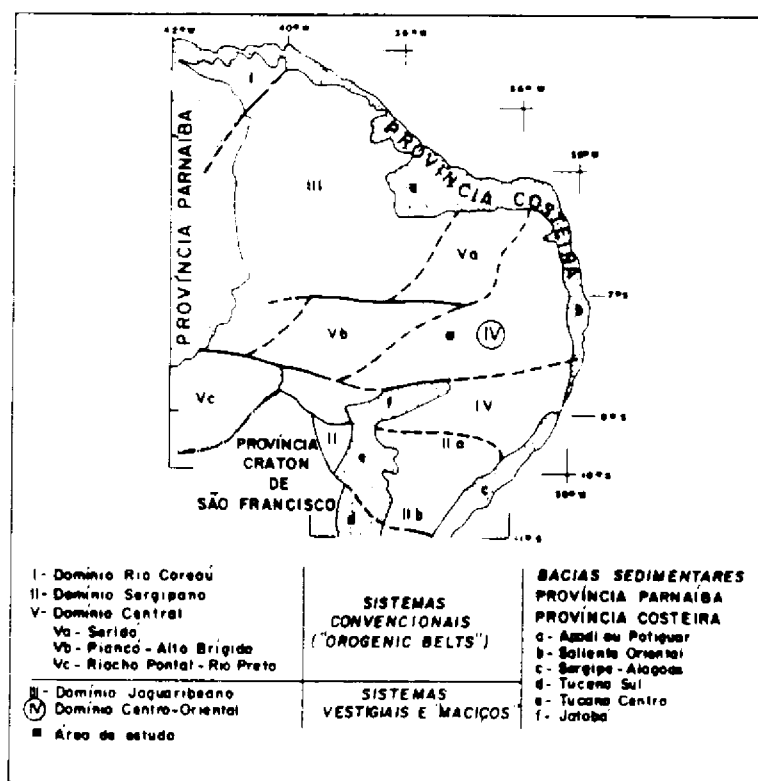


Fig. 2.4 - Domínios geológicos da província Borborema.

FONTE: Brito Neves (1983), p. 21.

Do ponto de vista geológico-estrutural, o que se destaca na região é a estrutura complexa e bastante variada. Ela ocorre devido a uma tectônica compressiva que resultou em intenso cisalhamento representado por um bem desenvolvido padrão de falhas transcorrentes e de empurrão,

com extensão e rejeitos consideráveis, e migração variável, muitas vezes justapondo unidades litológicas geradas em níveis crustais distintos (Brito Neves, 1975; Wanderley, 1990).

O exemplo mais evidente desse padrão tectono-estrutural movimentado é a chamada "zona transversal" delimitada pelos lineamentos E-W, Patos ao norte (paralelo 7º) e Pernambuco ao sul (paralelo 8º), na porção meridional da Província Borborema, (Figura 2.3). A região ao sul do Lineamento Pernambuco mostra características de uma zona estável no Proterozóico Superior (Ciclo Brasileiro), enquanto a região ao norte deste falhamento apresenta-se intensamente dobrada e cortada por extensos falhamentos, que impõem formas losangulares de tamanhos variados, dispersas em toda região. Este padrão distinto de comportamento tectono-estrutural entre estas regiões motivou a designação de "zona móvel transversal" (Mello et al., 1977) para a porção meridional da Província da Borborema.

Com relação às contribuições geológicas que versam sobre aspectos litoestratigráficos regionais, é apresentado um resumo de nomenclaturas estratigráficas, que abrangem a área de estudos na Tabela 2.1.

Barbosa (1965), ao mapear a região do médio rio São Francisco desde Andorinhas-Caraíbas (BA) até Patos (PB) propôs, provisoriamente, para a região sul de Patos os seguintes grupos litoestratigráficos: "Grupo Uauá" (paragnaisses com biotita, moscovita-gnaisses, quartzitos, calcários, metagrauvacas e anfibolitos intercalados); "Grupo Salgueiro" (biotita-xistos, xistos a duas micas e quartzitos) e "Grupo Cachoeirinha" (mica-xistos finos, filitos, clorita-xistos, itabiritos, quartzitos, anfibolitos), além de corpos graníticos circunscritos dispersos por toda região. Atribuiu idade arqueana para o "Grupo Uauá", e

para os demais, proterozóica inferior a médio e superior.

Ferreira e Albuquerque (1969) estudaram a região do Seridó até o limite do Lineamento Patos que engloba parte da área mapeada por Barbosa (1965), e reconheceram os Grupos Caicó (metarcósios, gnaisses, xistos, calcários, anfíbolitos, quartzitos e migmatitos), um embasamento arqueno Pré-Caicó (migmatitos diversos), e o Grupo Seridó, com as Formações Equador (quartzitos), Jucurutu (gnaisses), Seridó (biotita-xistos) e Cachoeirinha (filitos e xistos).

Albuquerque (1970) adotou a mesma nomenclatura de Ferreira e Albuquerque (1969), destacando no contexto da região de Patos a marca estrutural dos Lineamentos Patos (de direção E-W) e o Cariris Velhos (que converge da direção ENE-WSW para E-W na porção NE da região), enquanto Barbosa (1970) ratificou a sua proposta anterior para a região.

Parte dos litotipos pertencentes ao Grupo Uauá de Barbosa (1965) pode ser o embasamento do Grupo Seridó, denominado Grupo Caicó por Ferreira e Albuquerque (1969), enquanto os litotipos da Formação Cachoeirinha são os mesmos do Grupo Cachoeirinha (Barbosa, 1965). Independente disto, os litotipos reunidos sob a designação de grupos Uauá e Caicó por Barbosa (1965, 1970) e Ferreira e Albuquerque (1969) respectivamente, são os mesmos descritos por Brito Neves (1983), que caracterizam o embasamento do Sistema de Dobramentos Pajeú-Paraíba.

Santos (1971) descreveu para a região a sudeste de Patos (PB), na Folha SC.24E/Arcoverde-PE, escala 1:200.000, o Complexo Gnáissico-Migmatítico, ou Complexo Alto Moxotó (Santos, 1977), constituído por três unidades litoestratigráficas distintas, denominadas sequências Feliciano, São Caetano e Sertânia, e um pacote de biotita-xis-

tos (micaxistos do tipo Carcoalina), além de granitóides filonianos e estratóides associados a fraturas profundas. As sequências Feliciano, São Caetano e Sertânia reúnem migmatitos, xistos, itabiritos, mármore e cálcio-silicáticas, além de uma suíte de rochas plutônicas variadas.

Sousa (1972) descreve para as cercanias da cidade de Jabitacá, ao sul de Patos e dentro da área de estudos, a ocorrência de granitos, metagabros, migmatitos heterogêneos, anfíbolitos e lentes de calcário, além de uma metagrauvaca, que consiste no tipo litológico dominante, tendo como minerais principais quartzo, biotita, plagioclásio e epidoto.

Figueiras (1972) verificou a continuidade das litologias descritas por Sousa (1972), estendendo sua área de ocorrência para a região ao sul de Jabitacá.

Dantas (1980) reuniu num Complexo Gnáissico-Migmatítico toda a unidade pré-cambriana (Grupos Uauá ou Caicó) de maior extensão no Estado de Pernambuco, que se estende numa faixa contínua, grosseiramente ENE-WSW, desde a cidade de Arcoverde até o extremo oeste do Estado, separando os Grupos Salgueiro e Cachoeirinha do Proterozóico Médio a Superior, e destacando a ocorrência de batólitos graníticos, granodioríticos e gabróides por toda esta região.

TABELA 2.1 - RESUMO DE NOMENCLATURAS ESTRATIGRÁFICAS
PROPOSTAS QUE ABRANGEM A ÁREA DE ESTUDO

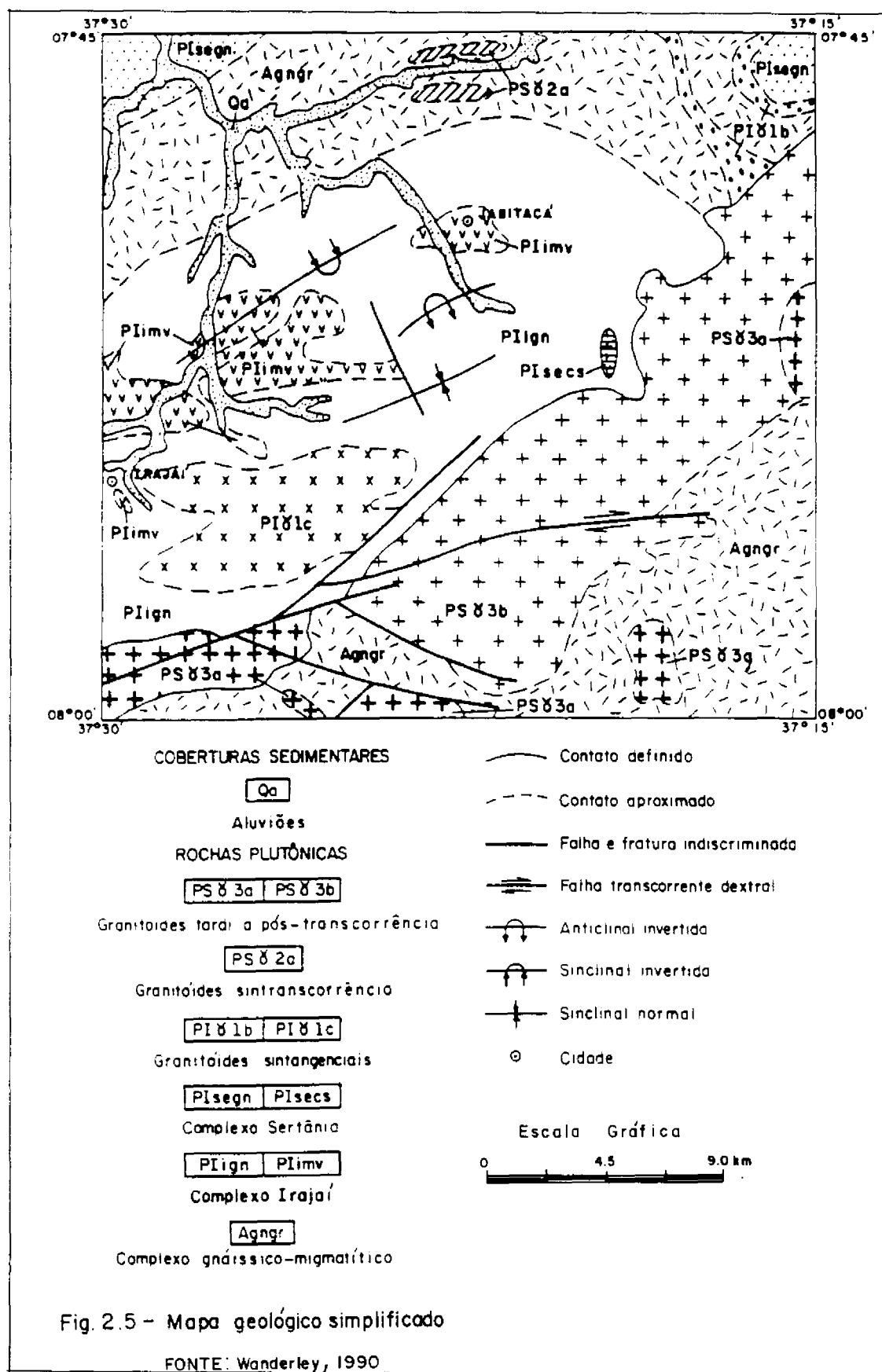
			FERREIRA E ALBUQUERQUE (1969); ALBUQUERQUE (1970).	BARBOSA (1965; 1970)	SANTOS (1971; 1977)	SOUSA (1972); FIGUEIRAS: (1972)	DANTAS (1980)	WANDERLEY (1989)
P R O T E R O Z O I C O	S U P E R I O R	G R U P O S E R I D O	FORMAÇÃO CACHOEIRINHA filitos, xistos e quartzitos.	GRUPO CACHOEIRINHA filitos, clorita- xistos, quartzitos.	Granitóides diversas	Anfibolitos, Escarnitos e Calcários.	Diques de diabásio, Sienitos, Granitos e Granodioritos.	GRANITÓIDES DIVERSOS
			FORMAÇÃO SERIDÓ biotita-xisto, calcários e tactitos.					
			FORMAÇÃO JUCURUTU gnaisses com epidoto, calcários e tactitos.					
	MÉDIO			GRUPO SALGUEIRO: biotita-xisto, bio- tita-moscovita-xis- tos	COMPLEXO GNÁISSICO- MIGMATÍTICO: SEQUÊNCIA S. CAETANO: biotita-moscovita- gnaisses e xistos. SEQUÊNCIA SERTÂNIA biotita-gnaisses, gnaís- ses com sillimanita, quartzitos e calcários.	Anfibolitos, Escarnitos e Calcários.	GRUPO CACHOEIRINHA	
I N F E R I O R			FORMAÇÃO EQUADOR moscovita-quartzito e conglomerado.			Metagrauwacas	GRUPO SALGUEIRO COMPLEXO GNÁISSICO- MIGMATÍTICO.	COMPLEXO SERTÂNIA biotita-gnaisses
							Granitos, granodiorí- tos, dioritos. Tonalitos, Sienitos e Gabros.	COMPLEXO IRAJÁ paragnaisses a duas micas; metavulcânicas diversas
A R Q U E A N O			GRUPO CAICÓ migmatitos, calcários anfibolitos, metarcósios	GRUPO UAUÁ: quartzitos, xistos, anfibolitos, calcis- silicáticas, gnaís- ses e migmatitos.	SEQUÊNCIA FELICIANO biotita-gnaisses, gnaís- ses granodioríticos e tonalíticos e anfiboli- tos.	Migmatitos Granitos metassomáticos	COMPLEXO MIGMATÍTICO- GRANITÓIDE	COMPLEXO GNÁISSICO- MIGMATÍTICO
			EMBASAMENTO PRÉ - CAICÓ migmatitos.					

Wanderley (1990) mapeou a área da Folha SB-24-Z-C-IV, Monteiro, onde se insere a área de estudos, no quadrante sudoeste, e delimitou quatro grandes unidades li-toestratigráficas, denominadas Complexo Gnaíssico-Migmatítico; Complexo Irajá; Complexo Sertânia; rochas plutônicas, além de coberturas sedimentares recentes. Reconheceu o caráter policíclico e polifásico de deformação e metomorfismo (facies anfibolito médio a alto) na região, com eventos que remontam ao Arqueano, representado pelo Complexo Gnaíssico-Migmatítico, e ao Proterozóico Inferior, onde se teriam implantado e desenvolvido os Complexos Irajá e Sertânia, todos com acentuado retrabalhamento durante o Ciclo Brasileiro, no Proterozóico Superior, já com retrometamorfismo na facies xisto-verde. A Figura 2.5 sintetiza o conhecimento geológico atualizado da área de estudos através do mapa geológico simplificado do PLGB (Wanderley, 1990). Uma descrição mais detalhada da geologia local é mostrada na análise e correlação do mapa fotogeológico (Capítulo 5).

2.4 - RECURSOS MINERAIS

A atividade mineira na área de estudo restringe-se à extração de calcários cristalinos para a fabricação de cal e de argilas, ao longo das margens do rio Pajeú e afluentes, para fabricação de telhas e tijolos de consumo local. Areias diversas para construção civil também são exploradas.

Dentre os bens minerais com potencial para exploração econômica, o calcário cristalino é o mais expressivo. Secundariamente, foram cadastradas durante os trabalhos do PLGB ocorrências minerais de talco e vermiculita associadas a corpos lenticulares de metavulcânicas máficas e metagabros, no domínio do Complexo Irajá.



A mineralização de vermiculita é do tipo disseminada, dentro do metagabro com acamamento ígneo, formando faixas ricas em vermiculita de cor castanha-escura em palhetas agrupadas e pequenos nódulos. A mineralização de talco ocorre em lentes de metaultramáficas encaixadas em leucognaisses feldspáticos.

Dados geoquímicos e geofísicos indicaram áreas favoráveis e pontos anômalos para ouro e vanádio no domínio do Complexo Irajá, além de indícios radiométricos (abaixo de 500 cps). Acima de 1500 cps há indícios relacionados a granitóides tardi a pós-transcorrentes (Ferreira, 1990). Deve-se também citar a anomalia relacionada ao corpo magnético do granitóide da localidade de Duas Barras.

CAPÍTULO 3

CONCEITUAÇÃO E ESPECIFICAÇÃO DOS DADOS E SISTEMAS UTILIZADOS

Como os dados utilizados provêm de sensores que medem e registram diferentes propriedades físicas dos materiais terrestres, neste capítulo serão apresentados, além dos dados utilizados, as características e propriedades por eles medidas e expressas e o suporte computacional necessário à execução da pesquisa. Uma revisão de alguns trabalhos sobre integração de dados em geologia também será fornecida.

3.1 - DADOS MULTIESPECTRAIS

A radiação solar ou radiação eletromagnética (REM) incidente sobre a superfície terrestre interage com seus componentes (rochas, solos, água, vegetação), sendo absorvida, refletida e/ou espalhada de forma diferenciada por cada um deles. As mudanças introduzidas na REM por essas interações dependem fortemente das propriedades físicas e químicas dos materiais. O fluxo de REM resultante pode se constituir numa fonte valiosa de informação sobre os materiais alcançados. Esse fluxo de radiação proveniente dos componentes terrestres motiva a criação de equipamentos para medi-lo a grandes distâncias e constituem-se nos dados multiespectrais de sensoriamento remoto.

As interações da REM com os materiais geológicos ocorrem nos campos macroscópico e microscópico. No primeiro, os efeitos são controlados pelas propriedades físicas das superfícies (forma, tamanho, grau de compactação das partículas minerais e das micro e macro variações de relevo). No campo microscópico, a interação está mais relacionada com a composição mineralógica da rocha, e ocorre

nos níveis atômicos e moleculares, originando as bandas ou feições de absorção espectral observadas nas curvas de reflectância dos minerais e rochas.

A origem das feições de absorção espectral dos minerais e rochas envolve o conceito de níveis discretos de energia da teoria quântica, devendo-se a dois processos de mudança no conteúdo de energia total desses materiais. Os processos são eletrônicos ou de transições eletrônicas, e vibracionais ou de transições moleculares (Hunt, 1977).

Como os materiais diferem entre si por seus arranjos atômicos, diferentes respostas espectrais são esperadas após as interações da REM com esses materiais. Com base nas mudanças introduzidas pelos alvos nas características espectrais do fluxo refletido, pode-se pensar na caracterização de todos os materiais através do sensoriamento remoto o que, na prática, poucas vezes ocorre.

Entre os fatores que contribuem para que essa caracterização não ocorra, estão a complexidade da natureza física das superfícies, a influência dos efeitos atmosféricos, a ambiguidade do comportamento espectral de muitos materiais, a geometria fonte-alvo-sensor, e o fato de que a resposta captada pelo sensor é uma média ponderada de todas as respostas dentro de um elemento de resolução no terreno, ou seja, ela é relativa ao contexto da associação "rocha-solo-água-vegetação". A Figura 3.1 mostra uma situação hipotética de sensoriamento remoto onde constam os elementos da fase de aquisição e a trajetória da REM na atmosfera.

Do ponto de vista estritamente geológico, outros fatores, particularmente importantes, que dificultam a discriminação de muitos minerais e rochas, segundo Salisbury e Hunt (1974), são:

a) muitos minerais constituintes das rochas não exibem feições espectrais diagnósticas entre 0,4 micrometro (μm) e 2,5 μm ;

b) os constituintes menores ou os produtos de alteração de uma rocha podem dominar seu espectro de refletância;

c) muitas rochas contêm minerais opacos que, em determinada quantidade, não apenas reduzem a refletância da rocha, como também mascaram suas feições espectrais;

d) muitas feições espectrais diagnósticas de rochas podem ser mascaradas pela interferência da atmosfera.

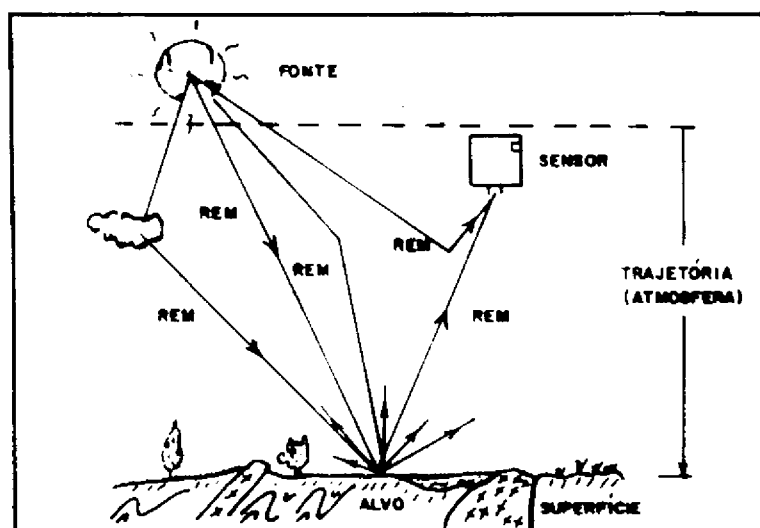


Fig. 3.1 - Elementos da fase de aquisição e a trajetória da radiação eletromagnética (REM) na atmosfera.

FONTE: Adaptada de Steffen et al. (1980), p.I.3.

Apesar das limitações e dos inúmeros fatores que dificultam a análise e a interpretação de dados multiespectrais, é possível obter informações dos objetos imageados a partir do conhecimento das principais feições de

absorção espectral de minerais e rochas. As feições ou bandas de absorção espectral dos minerais e rochas, bem como de outros alvos naturais como solos, vegetação e água são determinadas por medidas de laboratório e de campo, o que permite conhecer o comportamento espectral desses alvos naturais para utilizá-lo no auxílio ao processo de análise e interpretação dos dados multiespectrais de sensoriamento remoto.

Na área de Geologia, são expressivas as contribuições, entre outras, de Hunt (1977, 1980); Salisbury e Hunt (1968, 1974) e Hovis e Callaghan (1966) para o conhecimento do comportamento espectral de muitos minerais e rochas. O conhecimento do comportamento espectral dos alvos naturais tem também balizado a escolha das bandas ou dos intervalos espectrais dispostos nos sistemas sensores como, por exemplo, as bandas espectrais do "Thematic Mapper" (TM) do sistema satélite Landsat-5. As bandas espectrais, com a indicação das respectivas aplicações potenciais para discriminação de alvos da superfície terrestre, são apresentadas na Tabela 3.1.

O satélite Landsat-5, lançado em 1984, opera numa órbita circular, quase polar, solsíncrona, com altitude nominal no Equador de 705,3 km, realizando 14 órbitas por dia e cobrindo a mesma área a cada 16 dias. O satélite cruza o Equador, no sentido Norte-Sul às 9:45 horas (+ ou - 15 minutos) e, no paralelo 34º, no extremo sul do Brasil (RS), às 9:50 horas.

O sensor "Thematic Mapper" (TM) montado a bordo do satélite Landsat-5 imageia a superfície terrestre, simultaneamente em sete diferentes bandas espectrais, sendo seis bandas na faixa do visível e do infravermelho refletido, próximo e médio, e uma banda no infravermelho termal. A Resolução Espacial das Bandas TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e

TM7 é de 30 metros, enquanto a banda TM6, do termal, têm resolução espacial de 120 metros. O sensor TM imageia 16 linhas por varredura (480 metros) num total de 6.166 x 6.166 linhas por cena (185 x 185 km), o que corresponde a uma área total de 34.225 km².

3.1.1 - DADOS MULTIESPECTRAIS UTILIZADOS

Os dados multiespectrais utilizados foram os do sistema TM/Landsat-5, na forma dos seguintes produtos:

a) imagens fotográficas TM/Landsat-5

As imagens fotográficas TM/Landsat-5 empregadas na fotointerpretação são relativas à órbita 215/65 (quadrante C) e órbita 215/66 (quadrante A), nas bandas 4, 5 e 7, todas em branco e preto e na escala de 1:100.000. A passagem escolhida foi de 10.12.84, do final da época seca, com ângulo de elevação solar de 54° e ângulo azimutal de 118°. Quando se escolheu as imagens não havia outras passagens gravadas de boa qualidade e com baixa porcentagem de cobertura de nuvens na região.

b) fita magnética CCT TM/Landsat-5

Foi utilizada uma fita CCT (Computer Compatible Tapes) do sistema TM/Landsat-5, da órbita 215, ponto 65 de 10.12.84. Com exceção da banda 6 (banda do termal), as demais (1, 2, 3, 4, 5, e 7) foram analisadas. Esta fita contém armazenados os dados coletados e registrados pelo sensor TM em uma série de números digitais de cada "pixel" do terreno. Cada "pixel" pode assumir 256 níveis de cinza (NC), entre o preto = 0 (sem informação) e o branco = 255 (saturado).

TABELA 3.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES POTENCIAIS DAS BANDAS "TM" DO SATÉLITE LANDSAT-5

BANDA	INTERVALO ESPECTRAL	APLICAÇÕES POTENCIAIS
TM1	(0,45 - 0,52 μm)	estudos batimétricos, diferenciação solo/vegetação; alguma possibilidade de identificação de Fe^{+3} e Mn^{+3}
TM2	(0,52 - 0,60 μm)	mapeamento de vegetação sadia; estudo de sedimentos em suspensão
TM3	(0,63 - 0,69 μm)	diferenciação de coberturas vegetais; discriminação de materiais contendo limonitas dos sem limonitas
TM4	(0,76 - 0,90 μm)	estudos de volume de biomassa; de lineação de corpos d'água; discriminação rocha/solo/vegetação
TM5	(1,55 - 1,75 μm)	estudos de "stress" de vegetação; estudos sobre umidade de solos; região de máxima reflectância de materiais silicáticos
TM6	(10,4 - 12,5 μm)	estudos de contrastes térmicos
TM7	(2,08 - 2,35 μm)	selecionada para identificar minerais c/íons hidroxilas; potencialmente favorável ao mapeamento de zonas de alteração hidrotermal; bandas de absorção de carbonatos

Detalhes sobre os princípios de aquisição dos dados e das características do sistema TM/Landsat-5 podem ser encontrados em Slater (1980), AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY/ASP (1983), Engel e Weinstein (1983).

3.2 - DADOS AEROGEOFÍSICOS

3.2.1 - DADOS MAGNETOMÉTRICOS

Os dados magnetométricos são os mais antigos tipos de dados geofísicos utilizados na investigação da Terra. As medidas por eles fornecidas mostram o somatório das perturbações do campo geomagnético causadas pela presença de minerais ferromagnéticos em superfície e sub-superfície, até uma profundidade que pode chegar a mais de 15 quilômetros.

As perturbações ou anomalias magnéticas são causadas pela variação na intensidade de magnetização da rocha (J), que é parcialmente devida à magnetização induzida (T) pelo campo magnético da Terra e, em parte, devida à magnetização natural remanente (R). A intensidade induzida vai depender primeiramente da susceptibilidade magnética e da força magnetizante.

As componentes J, T e R constituem vetores e se relacionam em comportamento simplificadaamente expresso da seguinte forma (Hood et al., 1979):

$$\begin{array}{c} \rightarrow \quad \rightarrow \quad \rightarrow \\ J = kT + R, \end{array} \quad (3.1)$$

onde:

k é a susceptibilidade magnética da rocha

A susceptibilidade magnética é a propriedade magnética mais significativa das rochas (Dobrin, 1960). Uma característica relevante da susceptibilidade magnética consiste no fato de que, por ela estar ligada diretamente ao conteúdo de magnetita da rocha, é possível usá-la como uma medida do conteúdo de magnetita e, conseqüentemente, do contraste magnético entre litologias. Contudo, a susceptibilidade magnética é medida no laboratório ou no campo. Nos aerolevantamentos dispõe-se dos valores de intensidade de variação do campo magnético total.

A Tabela 3.2 mostra alguns valores representativos da susceptibilidade magnética para diferentes tipos de minerais e rochas. Nota-se que a magnetita é o mais magnético dos minerais e a sua presença em quantidade contribuirá, em maior ou menor intensidade, para a magnetização da rocha. As rochas máficas geralmente apresentam maiores susceptibilidades magnéticas que as félsicas, enquanto as metamórficas têm propriedades magnéticas de alguma forma imprevisíveis, devido à sua variabilidade mineralógica.

Os dados aeromagnetométricos são expressos em unidades de tesla ou de gamma para campo magnético total, miliampère por metro para intensidade de magnetização e kappa para susceptibilidade magnética. As relações entre estas unidades são $1 \text{ tesla} = 10.000 \text{ oersted}$ e $1 \text{ gamma} = 10^{-5} \text{ oersted}$ $1 \text{ gamma} = 10^{-9} \text{ tesla (nT)} = 1 \text{ nanotesla}$. Uma rocha com 1% em volume de magnetita tem susceptibilidade magnética de 37.7 kappas.

TABELA 3.2 - VALORES DE SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA DE AL-
GUNS MINERAIS E ROCHAS

MATERIAL	K X 10 ⁶ , cgs
Magnetita	300.000 - 800.000
Pirrotita	125.000
Ilmenita	135.000
Granito	28 - 2.700
Diorito	46,8
Gabro	68,1 - 2,350
Diabásio	78 - 1.050
Basalto	680
Peridotito	12.500

FONTE : Simplificada a partir de Dobrin (1960),
p. 269.

Detalhes relativos à teoria, aos instrumentos de medida, às correções da variação diurna, às variações locais do campo geomagnético (nivelamento entre perfis) e à redução do IGRF (International Geomagnetic Reference Field) são encontrados em Dobrin (1960), Hood et al. (1979) e Marek (1984).

Dois parâmetros importantes dos dados magnetométricos são o da altitude de vôo em relação à fonte e o do espaçamento entre as linhas de vôo. Para diferentes alturas, os dados coletados nos níveis de menor elevação terão melhor resolução e definição das anomalias magnéticas. Isto é, para a maior altura, o efeito da feição magnética é atenuado em amplitude, praticamente ocorrendo até a supressão de anomalias, Figura 3.2.

No que diz respeito ao espaçamento das linhas de voo, quanto mais espaçadas elas forem, menores são as chances de detectar anomalias significativas e menos precisos serão os mapas finais.

Os dados aeromagnetométricos são muito úteis para os estudos geológico-geotectônicos, para o mapeamento geológico e para a prospecção mineral.

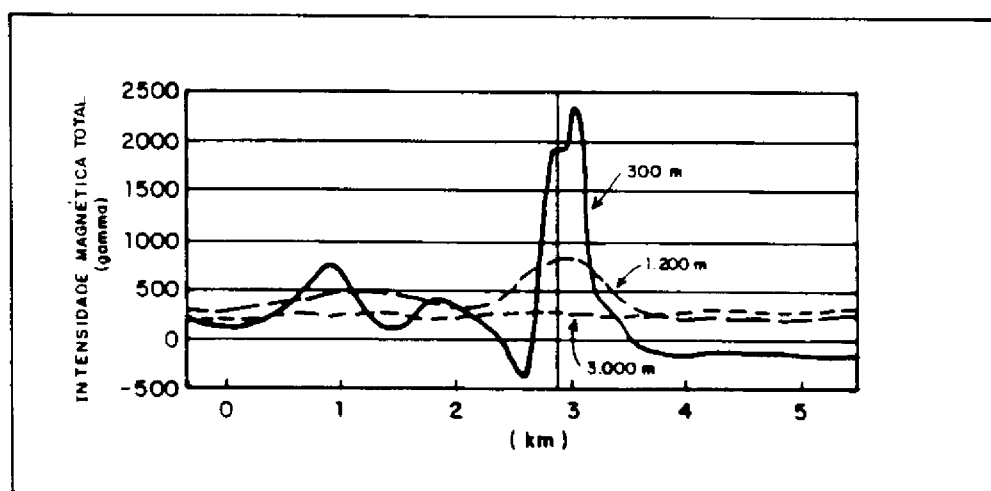


Fig. 3.2 - Variação da resolução espacial de dados aeromagnetométricos em função do aumento da altitude de voo.

FONTE: Dobrin (1960), p. 331.

3.2.2 - DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

A causa principal da radioatividade nas rochas, na água e no ar são os elementos radioativos naturais presentes na crosta da Terra. Para medir esta radioatividade são utilizados os chamados métodos radiométricos, os quais, em função do tipo de radiação medida, podem ser "alfa", "beta" e "raios-gama". Em aerogeofísica, a radiação predominante medida é a referente aos raios-gama.

Para a Geologia são importantes as medidas de fluxo de raios-gama ligadas ao decaimento radioativo dos elementos potássio, urânio e tório, que estão presentes com diferentes concentrações na superfície terrestre, mediante os níveis de radiação emitidos pelos elementos-filhos Potássio 40, Bismuto 214 e Tório 208, respectivamente. Por isso, utiliza-se a notação eTh, eU para indicar que não se trata de uma medição direta da abundância desses elementos.

A janela de radiação gama natural situa-se no intervalo de 0 a 3 MeV (milieletravolt). De acordo com o método empregado, as medidas de radiação podem ser de contagem total ou espectrométricas. Tem-se utilizado sistematicamente a gamaespectrometria com discriminação de energia nos levantamentos aerogeofísicos executados no Brasil a partir do início da década de 1970. Compreendem a medição segundo quatro janelas com as seguintes bandas de energia: 0,40 a 2,82 MeV (Contagem Total); 1,36 a 1,56 MeV (Potássio); 1,66 a 1,86 MeV (Urânio) e 2,42 a 2,82 MeV (Tório).

Os dados aerogamaespectrométricos consistem em medidas obtidas nessas janelas, segundo perfis cujos vãos possuem espaçamentos que variam geralmente entre 1 e 2 quilômetros, e altitudes que não devem exceder os 225 metros. A altitude nominal mais usada é de 122 metros. Os vãos de baixa altitude decorrem do fato de que a radiação gama é absorvida no ar numa taxa exponencial, o que dificulta sua medição e registro pelo sistema sensor em altitudes mais elevadas.

De acordo com Duval (1980), os dados gamaespectrométricos corrigidos fornecem uma visão da distribuição ou uma estimativa da concentração superficial aparente destes radioelementos no solo. Esta concentração é controlada pela composição mineralógica do substrato rochoso ("bedrock") e pode ser modificada pelo intemperismo, pela

erosão e pelo transporte de material.

Uma noção de conteúdo de K, U e Th em algumas classes e tipos de rochas mais comuns pode ser vista na Tabela 3.3, onde se observa que a radioatividade das rochas magmáticas tende a aumentar com a acidez, e os tipos intrusivos são ainda mais ativos que seus correspondentes extrusivos. As rochas básicas e ultrabásicas são caracterizadas por atividade radioativa muito baixa.

TABELA 3.3 - CONTEÚDO DE K, U e Th EM DIFERENTES CLASSES DE ROCHAS MAGMÁTICAS E EM ALGUNS TIPOS DE ROCHAS METAMÓRFICAS

ROCHAS	% SiO ₂	% K	ppm U	ppm Th
ácidas	Extrusivas	3,1	4,1	11,9
	60 a 70			
	Intrusivas	3,4	4,5	25,9
Intermediárias	Extrusivas	1,1	1,1	2,4
	52 a 60			
	Intrusivas	2,1	3,2	12,2
Básicas	Extrusivas	0,7	0,8	2,2
	40 a 52			
	Intrusivas	0,8	0,8	2,3
Ultrabásicas	40	0,3	0,3	1,4
Gnaisses		2,0	1,6	8,0
Anfibolitos		0,7	1,0	4,0
Mármore		0,4	1,1	1,8

FONTE : Modificada a partir de Kileen (1979); Matolín (1984).

A unidade usada para as taxas de contagem é usualmente referida como "contagem por unidade de tempo", onde a unidade mais comum é a de contagem por segundo (cps). Devido à inexistência de "pads" de teste no Brasil para a calibração dos equipamentos e transformação de cps em ppm (tório e urânio) e % (potássio), mantêm-se as unidades de cps.

As correções básicas aplicadas aos dados gamaespectrométricos incluem a redução da radiação de fundo resultante de raios cósmicos, a contaminação de aeronave e da radiação natural presente na atmosfera, a correção do Efeito Compton (espalhamento) nos canais de urânio e potássio e da correção das variações de leitura causadas pelas mudanças de altitude da aeronave em relação ao terreno.

Da mesma forma e com maior intensidade que os dados de magnetometria, os dados de gamaespectrometria são afetados pelos espaçamentos entre as linhas e pela altitude de voo, parâmetros estes que definirão a resolução e a cobertura no terreno (Pitkin e Duval, 1980).

A Figura 3.3 mostra que a resolução diminui com o aumento da altitude. Uma resolução de $0,03 \text{ km}^2$ para a altitude de 50 metros decai para $0,11 \text{ km}^2$ a 122 metros de altitude.

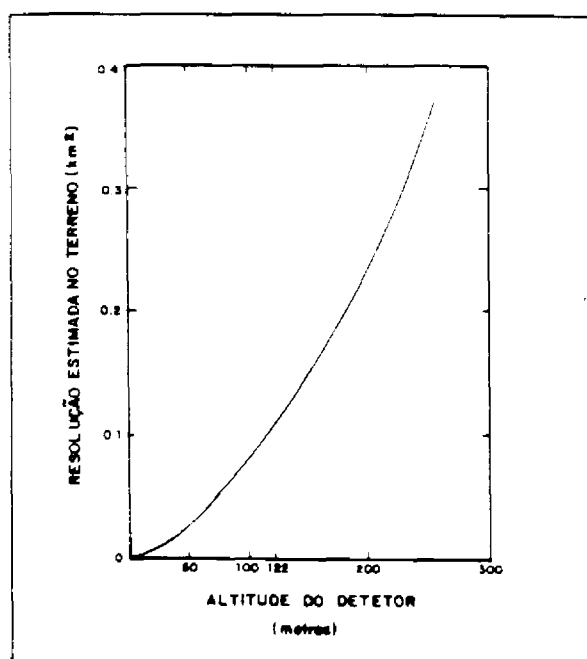


Fig. 3.3 - Resolução espacial estimada de dados gamaespectrométricos em função da altitude do detetor.

FONTE: Pitkin e Duval (1980), p. 1434.

A porcentagem de cobertura no terreno diminui com o decréscimo de altitude e à medida que aumentam os espaçamentos entre as linhas para a mesma altitude. Numa altitude de 122 metros, a porcentagem de cobertura é de 15% para um espaçamento de 2 km, e somente de 6% para 5 km, Figura 3.4. Os métodos de espectrometria de raios-gama têm ampla aplicação na exploração de materiais radioativos, no mapeamento geológico, nos estudos litológicos e de gênese de rochas e solos e na delimitação de linhas de discontinuidades geológicas.

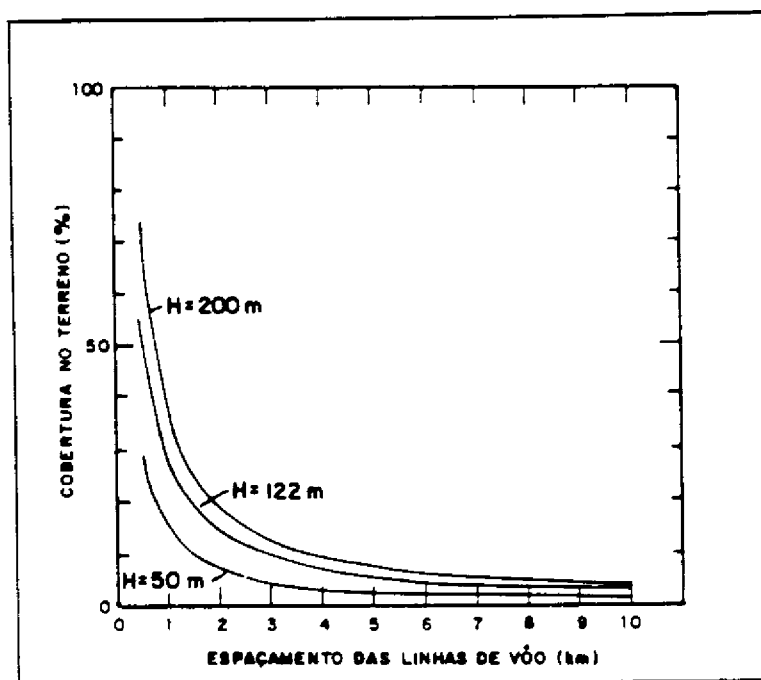


Fig. 3.4 - Porcentagens de cobertura do terreno de dados gamaespectrométricos em função dos espaçamentos entre as linhas de voo.

FONTE: Pitkin e Duval (1980), p. 1434.

Maiores detalhes sobre as técnicas de aerolevantamento, os instrumentos, os métodos de calibração dos sistemas, as janelas de radiação de raios-gama, os métodos de correção e de reportagem dos dados podem ser vistos em Kileen (1979), Pitkin e Duval (1980), Matolín (1984).

3.2.3 - DADOS AEROGEOFÍSICOS UTILIZADOS

Os dados aerogeofísicos utilizados foram os resultantes do Projeto Aerogeofísico Cariris Velhos, executado para o DNPM/CPRM pela GEOFOTO S.A., em 1976/77, que cobre uma área do Nordeste Oriental englobando parte dos Estados da Paraíba e de Pernambuco. Esse Projeto compreendeu a utilização de magnetometria e gamaespectrometria com discriminação de energia, segundo linhas de voo N-S, com intervalo entre perfis de 2.000 metros, altura média de voo

de 150 metros e registro analógico-digital dos dados. As correções aplicadas aos dados foram as clássicas, anteriormente citadas.

De posse das fitas magnéticas finais do Projeto, foi gerado um arquivo XYZ (coordenadas UTM e valores dos canais segundo trechos de linhas de voo) da área estudada no presente trabalho. A partir desse arquivo, foi aplicado um filtro antialiasamento aos canais de cada trecho de linha de voo, com frequência de corte de 0,002 ciclos/metros. Aplicando então "spline" bicúbica (função matemática utilizada para suavização de superfícies), foram gerados os "grids" de magnetometria (campo total), a contagem total, o tório, o urânio e o potássio, com células de dimensão de 250 x 250 metros. Nos "grids" que apresentaram problemas de nivelamento entre linhas de voo (magnetometria, tório e urânio, aplicou-se um filtro direcional cosseno para eliminar os "estiramentos" segundo a direção das linhas de voo. A razão urânio/tório foi obtida mediante divisão ponto a ponto dos "grids" de urânio e tório.

Finalmente, com o objetivo de atribuir a esses "grids" a mesma representação em superfície das imagens utilizadas, eles foram subdivididos utilizando "spline" bicúbica e passaram a apresentar células com dimensão de 60 x 60 metros.

Todo o tratamento prévio dos dados foi executado pelo Departamento de Prospeção da CPRM/RJ, que gentilmente forneceu os "grids" armazenados em fita CCT. Os "softwares" utilizados no tratamento dos dados foram os da PATERSON GRANT e WATSON LIMITED - PGW do Canadá implementados em ambiente "mainframe" na CPRM.

Deve-se salientar que no início da pesquisa, em 1988, ainda não se dispunha de um algoritmo para leitura direta dos dados digitais aerogeofísicos no sistema SITIM-150. Assim, usou-se também os mapas de contorno, em escala 1:100.000, para a aquisição manual dos dados através da digitalização, ponto a ponto, sobre as isolinhas dos mapas. Posteriormente, todo este procedimento foi substituído pela leitura direta dos dados na unidade de leitura de fita magnética do sistema SITIM-SGI/INPE.

Durante a pesquisa houve a necessidade de gerenciar e transformar os dados aerogeofísicos em imagens, tarefa realizada através do Sistema de Informações Geográficas do INPE, (SGI/INPE, versão 2.0). Em face disto, apresentam-se a seguir conceitos e algumas definições principais sobre sistemas de informações geográficas (SIGs), com ênfase no sistema utilizado, para que se tenha melhor compreensão do desenvolvimento do trabalho.

3.3 - SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIGs)

Os sistemas de informações geográficas podem ser entendidos como sistemas destinados à coleta, ao tratamento e à provisão de informações sobre elementos de expressão espacial.

De acordo com Marble (1984), um sistema de informações geográficas deve incorporar, basicamente, as funções de:

a) um subsistema de entrada de informações para coletar e processar dados espacialmente distribuídos de mapas, sensores remotos etc.;

b) um subsistema de armazenamento e recuperação, de modo a permitir o acesso eficiente aos dados para análise

e/ou comparações e atualizações na base de dados;

c) um subsistema de manipulação que possibilite realizar tarefas de transformação, extração de parâmetros, simulação de modelos etc.;

d) um subsistema para apresentação de dados, tanto sob a forma de tabelas, como de gráficos, e para visualização em monitores de vídeo.

Rodrigues (1990) destaca a importância de separar um SIG, "strictu sensu", que denota apenas um "software" para desempenhar as funções de coleta, armazenamento, manipulação e apresentação de dados referenciados espacialmente, do SIG "lato sensu", que representa o "software" e um conjunto de atividades de formulação, dimensionamento, programação e gerenciamento de aplicativos, bem como o pessoal técnico envolvido para operar o sistema e executar as funções descritas.

Dois conceitos importantes de um sistema de informações geográficas são os de "overlays" ou planos de informação (PIs) e o da representação de dados.

A Figura 3.5 ilustra o conceito de planos de informação. Nesta figura o mundo real é mostrado em uma série de planos. Cada plano está relacionado a um dado ou grandeza física do terreno e, assim, ele mapeia e descreve um atributo do terreno separadamente. Nesta estrutura, o usuário de um sistema SIG pode organizar o trabalho em **projeto(s)**, e neste(s), armazenar diferentes **planos de informação (PIs)**. Cada projeto deverá corresponder a um referencial geográfico distinto, e cada PI conterá um tipo de informação (uso do solo, vegetação, topografia, geologia, drenagem, rede viária) ligado à área de estudo.

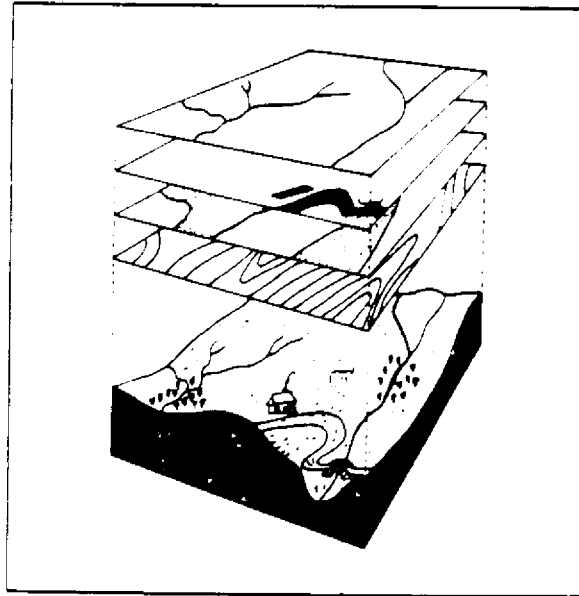


Fig. 3.5 - Conceito de "overlays" ou planos de informação (PIs) em um sistema de informações geográficas.
FONTE: Burroughs (1986), p. 20.

No tocante ao conceito de representação de dados, são duas as maneiras correntes de fazê-la em Sistemas de Informações Geográficas, a vetorial e a varredura ou "raster" (Burroughs, 1986).

A representação vetorial é feita por um conjunto de coordenadas no espaço bidimensional (2D), que delimitam regiões temáticas ou representam redes, armazenadas com as respectivas propriedades topológicas. A representação varredura dá-se através de grupos de celas implementadas como uma matriz 2D, onde cada cela (elemento de imagem ou "pixel") é identificada por índices de linha e coluna. Um número representa o tipo ou valor do atributo mapeado (usualmente de 0 a 255). É o formato de aquisição das imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. A Figura 3.6 ilustra as representações de dados do tipo vetorial e varredura.

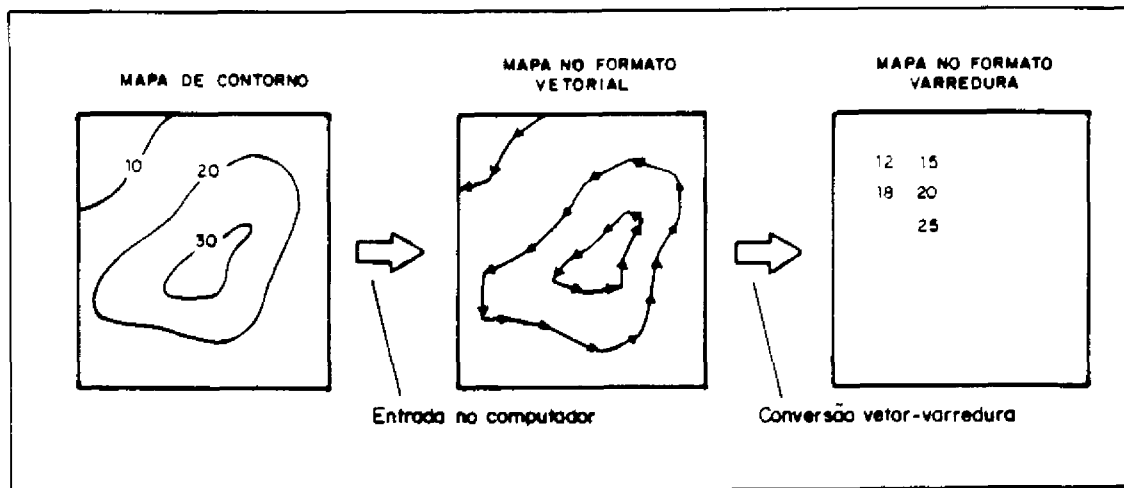


Fig. 3.6 - Representações de dados do tipo vetorial e varredura "raster".

FONTE: Richards (1986), p.26.

No sistema SGI/INPE, uma noção relevante para que o usuário possa tratar os dados corretamente, é a noção de **CATEGORIA** de dados. Uma categoria é definida pelo conjunto de dados espaciais, representados e tratados pelo sistema de mesma maneira (INPE, 1987).

Para exemplificar melhor, um PI contendo dados de magnetometria pertence à categoria de Modelo Numérico de Terreno (MNT), e pode ter associado vários arquivos de representações, correspondentes às fases de processamento, tais como vetorial (isolinhas), amostras 3D (amostras esparsas), árvore 2D (amostras ordenadas), grade regular e imagem (varredura).

O sistema SGI/INPE reconhece as seguintes categorias de dados (INPE, 1987):

a) polígonos (dados temáticos) - polígono ou conjunto de polígonos que delimitam regiões, onde cada região corresponde a uma classe (tema) determinada;

b) modelos numéricos de terreno (MNT) - representam a distribuição espacial de uma grandeza física;

c) imagens espectrais - imagens obtidas por satélites ou por digitalização de fotos aéreas.

Para operar o sistema o usuário dispõe, basicamente, de 5 módulos ou subsistemas funcionais:

a) DEFINIÇÃO - este módulo é destinado a montagem do ambiente de trabalho. Permite criar ou selecionar projeto e PIs e acessar informações da base de dados.

b) ENTRADA - reúne funções para inserir, organizar e editar novos dados. A entrada de dados pode ser manual (digitalização) ou automática (imagens de satélite). Outra entrada automática foi implementada através do algoritmo LE-CPRM para leitura direta de dados aerogeofísicos da CPRM, armazenados em fita magnética.

c) CONVERSÃO - destina-se à conversão de formato dos dados de um mesmo PI (vetorial-varredura e vice-versa; grade regular para vetorial e varredura; refinamento de grade regular etc.) e às transformações geométricas, tais como conversão entre sistemas de projeção cartográfica.

d) MANIPULAÇÃO - conjunto de funções para gerar informações derivadas do conteúdo da base de dados, ao nível de especificação do usuário.

e) SAÍDA - permite visualizar os dados numa unidade de vídeo e gerar documentos cartográficos em "plotters" e lis-

tagens no vídeo ou em impressora.

Além deste conjunto de funções orientadas para as várias fases de armazenamento e extração de informações codificadas espacialmente, existe um subsistema gerenciador, responsável pelo armazenamento e pela recuperação das informações da base de dados, e um de interação, responsável pela comunicação com o usuário na escolha do tipo de processamento desejado.

Nos últimos anos tem havido uma tendência crescente de os sistemas de informações geográficas aceitarem diretamente dados de sensoriamento remoto, ou de os sistemas de processamento digital de imagens incluírem aplicativos de sistemas de informações geográficas. Neste contexto, o SGI/INPE foi desenvolvido para operar integrado com o "software" do Sistema de Tratamento de Imagens (SITIM) para processamento e classificação digital de imagens. As imagens multiespectrais de sensoriamento remoto originais, realçadas ou classificadas, podem ser transferidas para o SGI e vice-versa, e as imagens geradas no SGI/INPE podem ser utilizadas no sistema SITIM-150. Maiores detalhes sobre o SITIM-150 podem ser obtidos no Manual do Usuário, à disposição no Laboratório de Tratamento de Imagens Digitais no INPE.

Essa tendência no desenvolvimento de SIGs tem sido justificada por autores como Marble (1984), que consideram os produtos de sensoriamento remoto como as maiores fontes de dados de tais sistemas. Esses produtos devem ser utilizados com uma amarração ou um referencial geográfico bem definido, que possibilite sobrepor-los a outros tipos de produtos como os cartográficos, buscando o melhor aproveitamento possível.

Maiores detalhes sobre sistemas de informações geográficas podem ser encontradas em Marble (1984); Burroughs (1986) e Richards (1986). Sobre o sistema SGI/INPE, podem ser encontradas informações em Erthal et al. (1986); INPE (1987); Felgueiras (1987).

3.4 - PANORÂMICA SOBRE A INTEGRAÇÃO DE DADOS EM GEOLOGIA

Neste item, apresenta-se uma revisão de trabalhos, com ênfase na integração de dados geológico-geofísicos e outros com dados de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. Busca-se, fundamentalmente, mostrar a prática da integração de dados por via computacional em aplicações geológicas, suas vantagens e desvantagens, além de transformações pertinentes a esse procedimento. Procurou-se também organizar a revisão como uma orientação preliminar para trabalhos futuros, pois no início deste estudo ainda não se dispunha de material mais especializado. Muitos passos foram experimentados para executar o trabalho como preconizado em nível pré-operacional.

Esta revisão não poderia ser realizada sem responder a, pelo menos, quatro perguntas usuais por quem pretende integrar dados em geologia:

Porque?;

Para que?;

Como?;

Que tipo de dado integrar?

A integração pode ser entendida como o processo de combinar diferentes tipos de dados espacialmente distribuídos, e de prepará-los para armazenamento, recuperação, análise e apresentação (Knapp 1980). Os objetivos de um trabalho de integração de dados podem incluir, entre outros, desde o propósito de facilitar o entendimento das ca-

racterísticas e a implementação de "softwares" e "hardwares" (Zhou, 1989), até a geração de produtos úteis para análise qualitativa e/ou quantitativa, através de procedimentos estatísticos automatizados.

No tocante à Geologia, os esforços concentram-se na busca de tecnologias que auxiliem a definição de áreas-alvos, motivando o emprego frequente de técnicas de integração de dados (Marston et al., 1982; Bolivar et al., 1983; Paterson e Walker, 1984; Poscolieri et al., 1986; Kowalik e Glenn, 1987), notadamente na pesquisa mineral, devido ao volume de dados e à possibilidade de reduzir os custos de execução das pesquisas.

A prática da integração de dados surgiu como decorrência natural do aparecimento das técnicas de sensoriamento remoto e da cartografia assistida por computador. A partir daí, estabeleceram-se os sistemas computacionais de gerenciamento de bases automatizadas de dados espacialmente distribuídos. Tais sistemas, conhecidos como Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), acoplados a sistemas de processamento digital de imagens, permitem uma flexibilização no manuseio conjunto das informações, com a vantagem de poder aplicar técnicas de análise e extração de informações (técnicas de realce, classificações, análises estatísticas, combinações, superposições, filtragens etc).

Aranoff et al. (1986) usaram imagens MSS/Landsat para identificar feições estruturais relacionadas a corpos intrusivos, além de dados geoquímicos e de ocorrências minerais para tentar localizar escarnitos scheelitíferos associados às intrusões graníticas cretácicas, pouco profundas, na região de Nahanni, na Cordilheira Canadense. Além do êxito na identificação e descoberta de novas estruturas, os autores concluíram pela vantagem desse tipo de investigação sobre os métodos convencionais de

apresentação, análise e interpretação de dados, destacando o incremento na velocidade de análise quando comparada com as técnicas tradicionais de superposição manual de "overlays" e mapas.

O aumento na velocidade de análise, citada por Aranoff et al. (1986), é função de vários fatores, tais como volume de dados, tipo de análise e capacidade de equipamentos e "softwares" utilizados. A experiência adquirida na pesquisa mostra, por exemplo, que a aquisição dos dados aerogeofísicos através da digitalização manual, ponto a ponto, sobre isolinhas de mapas de contorno, demanda tempo e pode inviabilizar a execução de um projeto, caso haja pretensão de realizá-lo sobre grandes áreas e/ou com um volume muito grande de mapas. O tempo de aquisição dos dados no computador pode ser excessivamente longo e onerar bastante o projeto. Além disto, a tarefa é cansativa e a probabilidade de erros é alta, principalmente sobre mapas com grande densidade de isolinhas.

Para integração de dados geológicos, geoquímicos e geofísicos com os das imagens de satélite, Eliason et al. (1983) descrevem como principais etapas do processo:

a) a geração da base de dados, incluindo a transformação dos dados do espaço vetorial para o espaço "raster" (do tipo varredura) através da geração da grade, interpolação dos dados e obtenção da imagem;

b) a correção geométrica das imagens de satélites;

c) o realce, a integração e a análise dos dados e produtos obtidos.

De acordo com Guinness et al. (1983), o modo pelo qual os dados são tratados para a geração das imagens depende, em parte, das características da distribuição geográfica, ou seja, de como eles foram obtidos, se em malha regular, irregularmente distribuídos ou eventualmente espaçados. Assim, antes da integração, cada grupo de dados poderá sofrer tratamento diferenciado dos demais. Para a transformação dos dados em imagens, aqueles autores sugerem que, inicialmente, os valores brutos sejam escalonados para ocupar 256 níveis de cinza; em seguida, que se crie a malha digital e, depois, coloque-se esta malha num sistema de projeção cartográfica.

Guinness et al. (1983) examinaram dados de sedimentos de corrente, dados aerogeofísicos, mapas de uso da terra, cartas topográficas e a primeira componente principal de imagens MSS/Landsat da região sudeste do Missouri, que cobrem uma área correspondente a uma quadrícula de $1^0 \times 2^0$. Os resultados favoreceram a visualização e o realce de anomalias gravimétricas, magnetométricas e gamaespectrométricas.

A utilização de dados armazenados no formato de imagens não é a única forma de integrar informações em Geologia. Pelo contrário, a tecnologia de geoprocessamento e integração de dados resulta mais do emprego de procedimentos desenvolvidos em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), do que propriamente de "softwares" e sistemas desenvolvidos para processamento digital de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. Estes últimos, sendo mais sofisticados, incluem maiores recursos, tais como técnicas de classificação e de reconhecimento de padrões. Nos SIGs superpõem-se, visualizam-se e combinam-se planos de informação por intermédio de operações matemáticas lógicas e simples, tais como operações de união e de intersecção. Assim sendo, inúmeras outras aplicações (geração de perfis;

intersecção; visualização em 3D; etc.) estão disponíveis para a integração de dados em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

De acordo com Crawford (1981) o fator determinante para a escolha dos dados deve ser a Geologia, a partir de um modelo geológico de exploração relativo ao prospecto investigado. Esse modelo deverá, assim, guiar toda a execução do trabalho. Esse autor seguiu um modelo para pesquisa de elementos terras raras no complexo carbonatítico da região de Bearlodge no Wyoming, EUA, e utilizou dados MSS/Landsat gamaespectrométricos e magnetométricos. Aplicou várias técnicas para realce e extração das informações, tais como análise canônica, análise por componentes principais e análise discriminante. Os resultados foram considerados bons para os objetivos do estudo, e diferenciados em função da natureza intrínseca dos dados que apresentaram uma baixa correlação na área de estudo.

Teoricamente, ao nível de equipamentos e de "softwares", qualquer tipo de dado pode ser integrado, e uma grande variedade de técnicas pode ser aplicada para análise e integração de dados. Em se tratando de imagens de níveis de cinza, todas as técnicas originariamente desenvolvidas para realçar ou melhorar a qualidade visual das imagens multiespectrais de sensoriamento remoto podem ser aplicadas com vistas na extração de informações.

Outros exemplos de trabalhos na área de integração de dados podem ser encontrados em Aarnissalo et al. (1982); Arkimaa (1982); Critchley et al. (1984); Carrere e Nguyen (1985); Quintanilla (1988); Paradella et al. (1990).

Para concluir, deve-se acrescentar que apesar de já existir, em vários países, um conhecimento e uma tradição na área de geoprocessamento e de integração de dados,

evidenciada pelo volume crescente de trabalhos e pelos inúmeros sistemas (SIGs) disponíveis, notadamente na área de Geologia do petróleo, no Brasil, essa tecnologia é relativamente recente e carece de vários estudos, sob diferentes condições experimentais e ambientais para evoluir nesse campo, no sensoriamento remoto e mesmo na rotina de seu uso em Geologia.

Para maiores esclarecimentos, pode-se tomar como exemplo os dados multiespectrais de sensoriamento remoto. No Brasil, eles são escassos, em termos de medidas de laboratório e de campo. Faltam análises químicas e petrográficas, além de equipamentos apropriados para tais estudos. Pouco se conhece do comportamento espectral de rochas, solos e dos produtos de alteração destes materiais sob as condições climáticas aqui encontradas.

A grande diversidade de ambientes e condições fisiográficas é também um fator limitante. Antes de ser um empecilho no avanço tecnológico, tal diversidade deve se constituir num laboratório de pesquisa e desenvolvimento, com a finalidade de alcançar e atender ao máximo as necessidades dos serviços da área de Geologia.

CAPÍTULO 4

METODOLOGIA DE TRABALHO

O fluxograma da Figura 4.1 apresenta as fases principais de desenvolvimento desta pesquisa. Ao longo do texto serão descritas as diversas subfases e tarefas necessárias à sua execução.

4.1 - SELEÇÃO DOS DADOS

A maneira mais simples e usual de proceder à seleção de dados para integração consiste na formulação de modelos geológicos ou de sensoriamento remoto. Esta sistemática é mais frequente quando se atua em pesquisa mineral. Atividades desta natureza são executadas, normalmente, em áreas pequenas, onde há indícios minerais, ou onde se detém razoável nível do conhecimento geológico do prospecto abordado, o que permite a montagem de modelos. Tais serviços caracterizam-se como de cunho local ou distrital, diferindo da estratégia de execução dos trabalhos de cunho regional (exploratórios, mapeamento regional, prospecção) de concepção e execução mais ampla.

Como nesta pesquisa procura-se dar uma conotação em prol dos trabalhos de caráter mais regional, analisaram-se as características dos mapeamentos, as principais fontes de dados e o quanto se poderia avançar no manuseio, na interpretação e no conhecimento geológico de uma região empregando a tecnologia de geoprocessamento e integração de dados. Ficou caracterizado após esta análise que, depois das fotografias aéreas e das imagens de radar e de satélite, os dados aerogeofísicos constituem-se na principal fonte de informações para estudos geológicos regionais. Quando não disponíveis, são, via de regra, os primeiros dados a serem coletados para estes estudos. Isto se deve ao

fato de que, tanto os dados aerogeofísicos quanto as imagens fotográficas permitem, a um custo mais baixo que o da investigação direta de campo, uma visão global do terreno e, por isto, são os mais indicados.

Em consonância com os objetivos do trabalho, selecionaram-se algumas variáveis significativas dos dados aerogeofísicos (campo magnético total; canal de contagem total; canais do eU, eTh e K e da razão eU/eTh) para integrá-los aos dados das imagens do sistema TM/Landsat-5, realçadas e selecionadas através da técnica de transformação por componentes principais.

Entende-se que estas variáveis representam o mínimo necessário para efeito de cartografia geológica básica de uma região. É claro, que outros tipos de dados podem e devem ser futuramente incorporados, muito embora saliente-se que, à medida que se incluir novos dados, mais tempo e capacidade operacional de equipamentos se farão necessários.

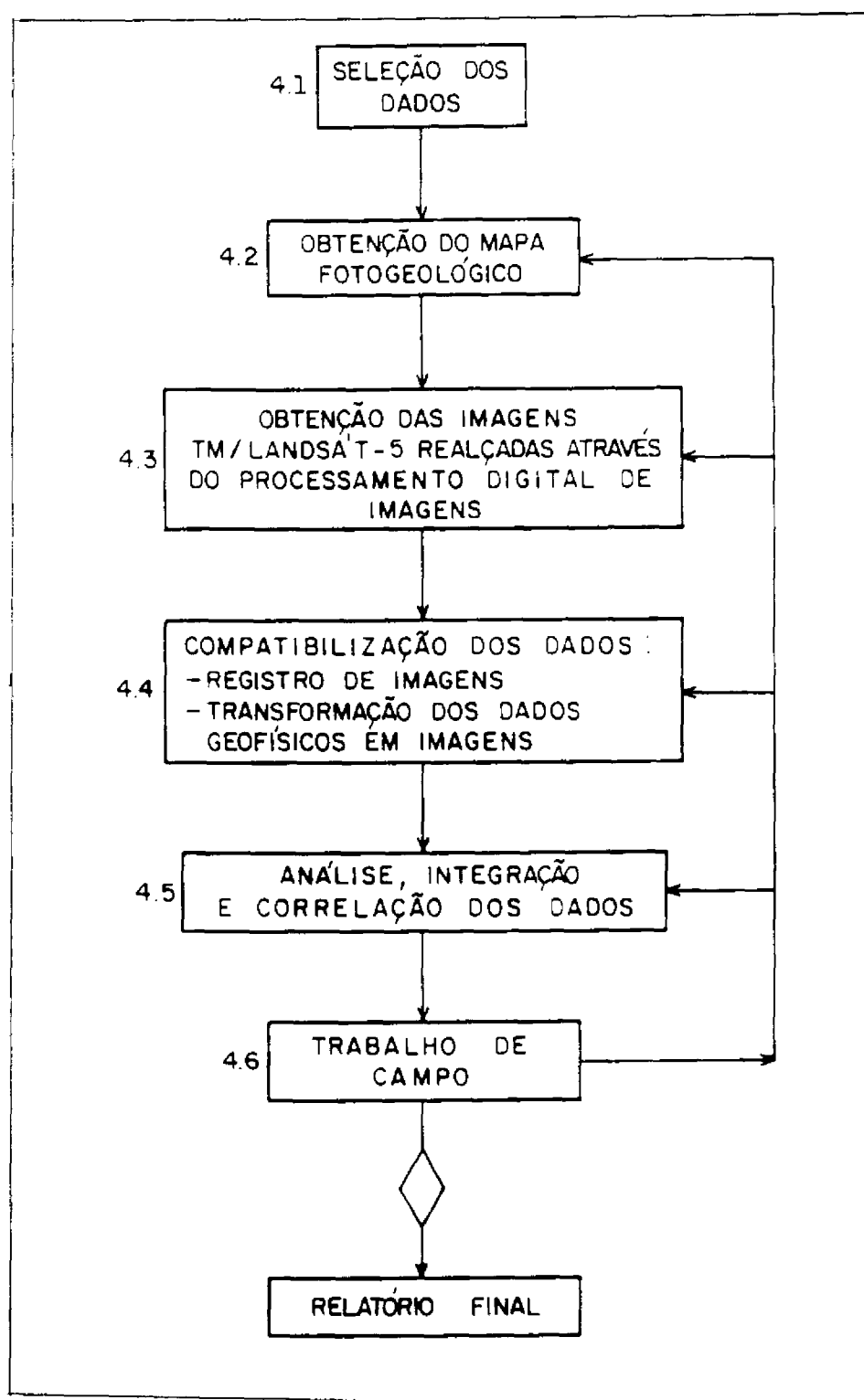


Fig. 4.1 - Fluxograma geral do trabalho.

4.2 - OBTENÇÃO DO MAPA FOTOGEOLÓGICO

O objetivo desta etapa foi elaborar o mapa fotogeológico da área de estudo com base nas imagens TM/Landsat-5. O mapa fotogeológico auxiliou na discriminação de unidades litológicas, litoestratigráficas e de estruturas geológicas, bem como na interpretação dos resultados.

Na elaboração do mapa fotogeológico, empregou-se o método sistemático, estabelecido a partir dos trabalhos de Guy (1966) e Rivereau (1970), para interpretação de fotografias aéreas. Difundido no Brasil por Soares e Fiori (1976), esse método foi posteriormente adaptado por Veneziani e Anjos (1982) para produtos de sensoriamento remoto de pequena escala, baixa resolução espacial e que não dispõem de recursos de estereoscopia.

A escolha do método baseou-se no fato de ele apresentar uma abordagem voltada para a análise dos elementos texturais de relevo, da rede de drenagem, e está adaptado (Veneziani e Anjos, 1982) de modo que as características dos produtos utilizados não interfiram nos procedimentos, os quais envolvem: 1) fotoleitura com definição, reconhecimento e identificação dos elementos de textura; 2) fotoanálise através do estudo do padrão de organização, no espaço, dos elementos texturais e das tonalidades (níveis) de cinza, para definir as propriedades que caracterizam a forma, e individualizar as áreas imageadas que possuam características semelhantes (zonas homólogas); 3) fotointerpretação, que consiste no processamento dedutivo e indutivo destas áreas em seu significado geológico.

Em função dos objetivos do trabalho, diferentes elementos de fotoanálise podem ser considerados. Neste estudo tiveram destaque os elementos texturais de relevo e

drenagem. Através da análise das propriedades texturais destes elementos e da caracterização das formas segundo suas propriedades é que foi feita a delimitação das zonas homólogas. A relação que pode ser atribuída a estes elementos e propriedades e o significado geológico associado nas imagens é mostrada na Tabela 4.1, montada a partir dos trabalhos de Veneziani e Anjos (1982) e Veneziani (1987).

Para estabelecer o relacionamento entre a textura fotográfica e as estruturas de feições e objetos na cena, e, desta forma, auxiliar e complementar a fotointerpretação, foram ainda considerados os elementos e fatores que compõem a paisagem superficial e influenciam na textura fotográfica, tais como os fatores morfogenéticos litológicos, deformacionais e antropogenéticos.

TABELA 4.1 - ALGUNS ELEMENTOS DE FOTOANÁLISE E O SEU SIGNIFICADO GEOLÓGICO ASSOCIADO NAS IMAGENS

Elementos de Fotoanálise (Propriedades texturais)	Elementos de Fotointerpretação (significado geológico)
Feições lineares de relevo e drenagem	Foliações/acabamentos ou zonas de concentração de fraturas
Alinhamentos de relevo e drenagem	Falhamentos ou descontinuidades geológicas)
Assimetrias de relevo e drenagem	Mergulho de feições planares
Quebras negativas de relevo	Contatos geológicos

Além de apresentarem uma boa descrição, Soares e Fiori (1976) e Riverau (1970) fazem, juntamente com Veneziani e Anjos (1982), uma revisão conceitual detalhada do método. A aplicação prática na interpretação de fotos aéreas, de imagens de satélite e de imagens de radar pode ser vista nos trabalhos de Mattos (1986), Veneziani (1987) e Crepani (1987).

4.3 - OBTENÇÃO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5 REALÇADAS ATRAVÉS DO PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Inicialmente foi feita a definição e gravação do módulo de imagem referente à área de estudo, visando facilitar o acesso aos dados repetidas vezes, sem necessidade de recorrer à fita original TM/Landsat-5. Os pré-processamentos serviram para corrigir erros sistemáticos e de calibração radiométrica da imagem (atenuação atmosférica, correção radiométrica), bem como a análise e extração da informação por meio da manipulação de contrastes radiométricos através de técnicas de realce de imagens.

As atividades de correção e realce de imagens, acrescidas das técnicas de classificação, que se baseiam no reconhecimento de padrões radiométricos, constituem o processamento digital de imagens. Sua execução se dá através de operações matemáticas, que transformam as imagens originais de entrada segundo interesses específicos do usuário.

As técnicas de classificação baseiam-se em análise e reconhecimento estatístico de padrões radiométricos de imagens que não foram utilizadas neste estudo. Essas técnicas, quando testadas para discriminação de feições geológicas ou com o objetivo de estabelecer uma metodologia de cartografia geológica automática, têm fornecido resultados, na maioria das vezes, negativos (Siegal e Abrams,

1976; Winge et al., 1986).

Entre as técnicas de realce que visam destacar certas informações espectrais ou melhorar a qualidade visual da cena, foram escolhidas as de maior aplicabilidade ao estudo como a Transformação por Componentes Principais ("Principal Components Analysis") e as Composições Coloridas RGB (Red, Green, Blue) de imagens originais ou transformadas.

A maior aplicabilidade decorre do fato de que estas técnicas permitem manusear um grande volume de dados (grandes áreas ou muitas bandas/canais) e não necessitam de informações externas. Dependem exclusivamente de cada cena e as limitações de uso vêm por conta de equipamentos (limitação de canais dos monitores e capacidade e velocidade de processamento).

Alguns fundamentos teóricos, os parâmetros e os passos de execução do pré-processamento e dos realces de imagens utilizados são apresentados a seguir.

4.3.1 - ATENUAÇÃO ATMOSFÉRICA

As partículas e os gases da atmosfera atuam absorvendo e espalhando seletivamente a radiação solar de diferentes comprimentos de onda. Isto provoca degradações nos dados de sensoriamento remoto, cujos efeitos são diferenciados, sendo marcante nos comprimentos de onda da região do visível (bandas TM1, TM2, TM3) e menos expressivos nos da região do infravermelho refletido (bandas TM4, TM5, e TM7). As principais consequências desse fato são a diminuição da qualidade dos dados, devido à atenuação da radiação e às contribuições adicionais do espalhamento atmosférico que reduz os contrastes espectrais mais finos da cena.

Uma maneira de eliminar a radiação adicional introduzida nos dados pelo efeito do espalhamento atmosférico seria através de dados de radiossondagem. Como eles são pouco disponíveis, existem métodos alternativos desenvolvidos para trabalhar com os dados da própria imagem, entre eles o método do mínimo histograma de Chavez Jr. (1975). Este método consiste em identificar, na imagem, regiões com sombras de nuvens ou de relevo, caracterizadas pela não-incidência direta da radiação eletromagnética, ou ainda, de corpos límpidos de água que absorvem quase toda a radiação incidente. Nestas áreas, os valores digitais não-nulos encontrados são considerados provenientes do efeito aditivo do espalhamento atmosférico, e o menor valor de cada uma das bandas é subtraído de toda a cena. Os valores obtidos em corpos d'água para atenuação atmosférica na área de pesquisa foram os seguintes: banda TM1 - 60; banda TM2 - 24; banda TM3 - 22; banda TM4 - 20; banda TM5 - 10 e banda TM7 - 03.

A melhoria introduzida nas relações de contraste dos alvos foi bastante significativa após aplicar a correção atmosférica nos dados.

4.3.2 - CORREÇÃO RADIOMÉTRICA

Frequentemente os dados originais Landsat apresentam alguma forma de degradação radiométrica, provocada tanto por desajustes de calibração de detetores, interferências externas, falhas mecânicas e mal funcionamento geral do sensor, como por problemas de registro, armazenamento e transmissão de dados, o que gera ruídos ou imperfeições na imagem gravada em fita magnética.

As técnicas de realce de imagem tendem a enfatizar os ruídos da imagem, daí a necessidade de removê-los, evitando-se, com isto, que eles sejam também realçados e prejudiquem a interpretação das imagens. Os ruídos mais frequentes das imagens Landsat são devidos ao aparecimento de faixas horizontais, denominados "stripping", os quais se devem a problemas de desajustes de calibração dos detetores e os ruídos ligados à perda de linhas da imagem, de alguma banda específica, denominados "dropped line".

Muitas vezes, os ruídos ou as imperfeições não são muito visíveis na escala em que se trabalha a imagem. Por isto, é conveniente fazer ampliações na tela do monitor para investigar melhor essas possíveis alterações. A correção de ruídos pode ser feita por intermédio de filtros digitais que atuam nas regiões de interesse ou em toda cena.

A correção aplicada consta do algoritmo para eliminação de ruídos do SITIM-150, o qual compara a média local da linha anterior com a média da linha corrente; caso a diferença destas médias seja menor que um limiar (valores default, 8 e 25), o ponto tem seu nível adicionado dessa diferença.

Maiores detalhes sobre a correção radiométrica de imagens podem ser obtidos em Taranik (1978); Schowengerdt (1983); Richards (1986).

4.3.3. - TRANSFORMAÇÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS

A técnica de transformação por componentes principais pode ser resumida num método que produz, a partir de combinações lineares de variáveis correlacionadas, um conjunto de novas variáveis ortogonais, não-correlacionadas.

A Figura 4.2 é uma representação hipotética da transformação, envolvendo uma rotação e translação relativas a um conjunto de variáveis de um imageador qualquer de dois canais.

A transformação envolve o cálculo de médias e da matriz de correlação, ou de variância-covariância dos dados, o cálculo dos autovalores e autovetores da matriz, e a aplicação da transformação, fazendo-se uma soma ponderada dos dados e usando os autovetores como ponderadores. Isto permite obter novas variáveis, chamadas componentes principais ou eixos, onde uma medida da quantidade de informação fornecida por cada componente é a sua variância. Por esta razão as componentes são organizadas em ordem decrescente de porcentagem de variância, de tal forma que a componente principal de maior conteúdo informativo vem a ser a primeira e a de menor conteúdo, a última.

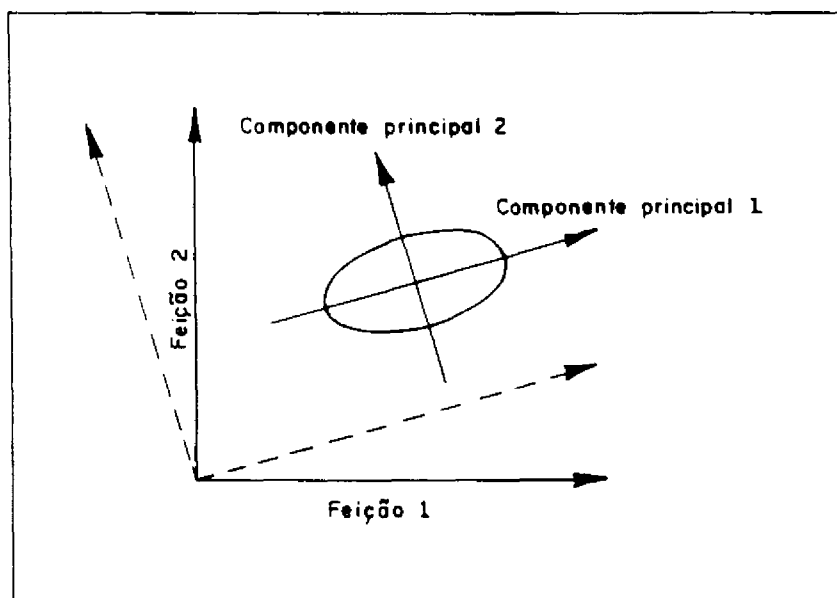


Fig. 4.2 - Representação hipotética da transformação por componentes principais.

FONTE: Schowengerdt (1983), p.162.

A análise por transformação de componentes principais é uma técnica exploratória que pode ser útil ao revelar inter-relações entre variáveis. A técnica permite uma visualização da estrutura dos dados multivariados (Afifi e Clark, 1984). É possível analisar o conteúdo de informação (variância-covariância dos dados), o nível de correlação e como os dados se combinam ou se reorganizam para os novos eixos ou componentes principais.

Em sensoriamento remoto a transformação de componentes principais de imagens multiespectrais tem sido muito utilizada para fins de discriminação litológica, estudos de detecção de alterações nas superfícies, e para reduzir a dimensionalidade dos dados das imagens (Byrne et al., 1980; Gillespie, 1980; Towshend et al., 1983; Paradella, 1983; Meneses, 1986; Fung e Ledrew, 1987; Chavez Jr. e Kwarteng, 1989).

A utilização da transformação por componentes principais teve por objetivos reduzir a dimensionalidade dos dados, superpor e integrar as diversas imagens e, numa primeira abordagem estatística, fornecer uma visão da estrutura e do inter-relacionamento ou de como se agrupam os dados aerogeofísicos e multiespectrais de sensoriamento remoto da área de estudo. Para isto, a sistemática adotada constou de duas etapas:

a) utilizaram-se as seis bandas do sensor TM/Landsat-5, aplicando a transformação (matriz de variância-covariância) para selecionar as três primeiras imagens componentes principais TM/Landsat-5;

b) reuniram-se as três imagens componentes principais TM/Landsat-5 com as imagens geofísicas dos canais do potássio, do tório e do urânio, aplicando, mais uma vez, a transformação por componentes principais e obtendo novas

imagens componentes principais, agora resultantes da integração dos dados gamaespectrométricos e multiespectrais.

A realização da tarefa em duas etapas ocorreu devido à limitação do sistema, que só permite agrupar 15 bandas por arquivo de imagens. Como o processo envolveria pelo menos 20 arquivos de imagens, a solução encontrada foi a de executar o trabalho em duas etapas.

A transformação utilizada foi a de componentes principais padronizadas. A transformação foi implementada para o SITIM-150 a partir dos trabalhos de Singh e Harrison (1985) e Galvão (1989). Neste caso, os dados foram normalizados através da transformada $z = (X - X_i)/S_i$, onde X_i e S_i são, respectivamente, a média e o desvio padrão (Davis, 1973; Singh e Harrison, 1985), e o cálculo da transformação realizado com base na matriz de correlação dos dados.

Maiores informações sobre a análise de transformação por componentes principais podem ser encontradas em Davis (1973); Singh e Harrison (1985); Afifi e Clark (1984).

A técnica oferece a vantagem de utilizar de uma só vez todos os dados da cena e, a priori, não necessita de informações externas. As imagens componentes principais resultantes podem ser analisadas individualmente ou agrupadas em composições coloridas.

Para Meneses (1986) uma desvantagem dessa técnica consiste na impossibilidade da interação com o analista, de modo que a avaliação dos resultados é baseada na análise dos valores estatísticos fornecidos pelo computador.

4.3.4 - COMPOSIÇÕES COLORIDAS RGB

A utilização de composições coloridas representa um recurso técnico valioso quando se trabalha com imagens multiespectrais de sensoriamento remoto e se pretende obter um ganho na representação visual da informação que possa ser mostrada em uma única imagem fotográfica. O método mais comumente usado é o de composições coloridas RGB. Consiste na combinação de três cores primárias com três diferentes bandas espectrais.

Trata-se de uma técnica de fácil implementação e de baixo custo, podendo-se obter bons resultados com composições RGB de imagens originais ou de imagens realçadas. Apenas três bandas podem ser combinadas devido à limitação de canais dos sistemas analisadores de imagens. A Figura 4.3 mostra graficamente o cubo de cores RGB, com a distribuição espacial e o princípio de geração de composições coloridas RGB.

Como não existem critérios definidos para montar as composições coloridas RGB, o que se faz é realizar testes permutando canais e cores. A escolha da(s) melhor(es) composição(ões) é baseada em algum conhecimento prévio sobre a área em estudo, de modo a obter composições que melhor mostrem para o intérprete as variações dos materiais da cena.

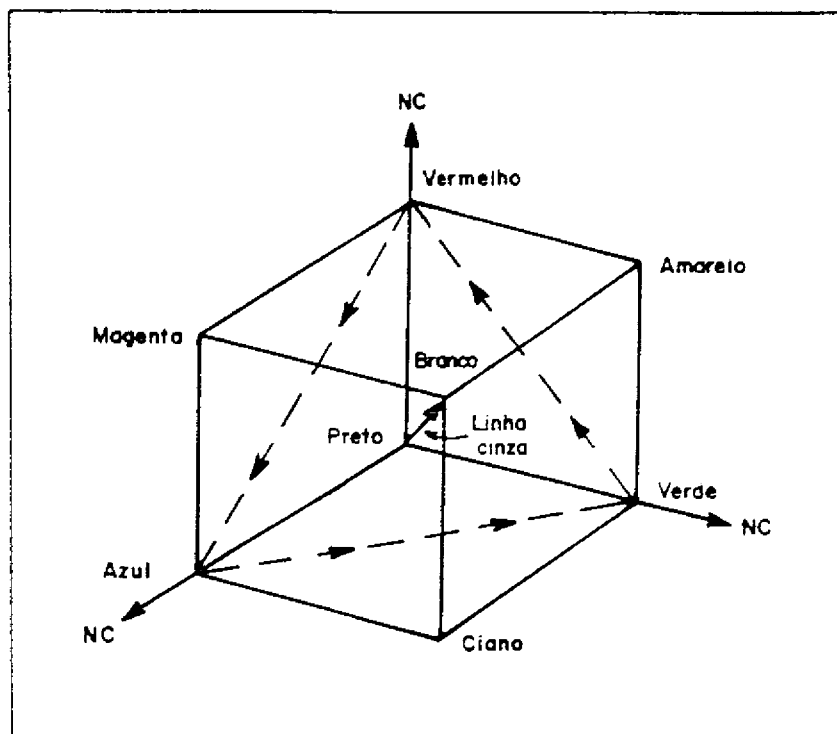


Fig. 4.3 - O cubo de cores RGB.

FONTE: Schowengerdt (1983), p.119.

Na interpretação das composições coloridas, consideraram-se tanto os atributos da cor (intensidade, matiz e saturação) como, no caso das imagens geofísicas, também a distribuição espacial ou o relevo dos dados.

Na imagem geofísica individual, as áreas claras representam os altos valores (gamaespectrométricos ou magnetométricos), e as áreas escuras, os valores mais baixos. Nas composições coloridas destas imagens (Nevitt e Barr, 1985), observou-se tanto o matiz como a composição de matizes para separar áreas com características similares e delimitar seus contornos, definidos onde a passagem é mais acentuada (mudança de cor ou saturação) e aproximados quando a passagem é mais sutil.

4.4 - COMPATIBILIZAÇÃO DOS DADOS

4.4.1 - REGISTRO DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5

O registro de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto constitui a interface para a integração de dados. O uso destas imagens como planos de informação em um SIG requer a correção de deslocamentos translacionais e rotacionais, bem como das distorções geométricas intrínsecas de cada imagem. O processo é conhecido como geocodificação.

Em sensoriamento remoto, uma imagem é dita geocodificada quando está registrada através de coordenadas de feições homólogas com os dados existentes, estando, portanto, orientada para o norte do sistema de projeção utilizado (Ii et al., 1989).

O registro de imagens baseia-se no estabelecimento de relações matemáticas entre os "pixels" da imagem e as coordenadas correspondentes no terreno, ou sobre uma carta geometricamente corrigida. Nesse processo definem-se, então, os sistemas de coordenadas cartesianas, em que um descreve a locação dos pontos no mapa (x, y) e o outro a locação dos "pixels" da imagem (u, v). Os dois sistemas podem ser relacionados através de um par de funções f e g de modo que $u = f(x, y)$ e $v = g(x, y)$, Figura 4.4.

Nesse processo, utilizam-se polinômios (método ou mapeamento polinomial) e tomam-se como coeficientes destas funções pares de pontos de controle: intersecções de estradas, confluências de rios, ou seja, pontos bem definidos (Figura 4.4) para assegurar uma boa retificação e um registro da imagem.

Após a aquisição dos pontos, são fornecidos o grau do polinômio, a localização geográfica, o tamanho e a resolução da grade. O algoritmo executa os cálculos e fornece relatórios, a partir dos quais o usuário pode conferir e modificar os parâmetros para melhorar a precisão do registro.

Definidos os parâmetros do registro, segue-se a fase de reamostragem das grades, na qual o algoritmo calcula o valor do nível de cinza que deverá ter o "pixel" sobre a nova grade da imagem de saída. A reamostragem pode ser feita por interpoladores do tipo vizinho mais próximo, bilinear, bicúbico.

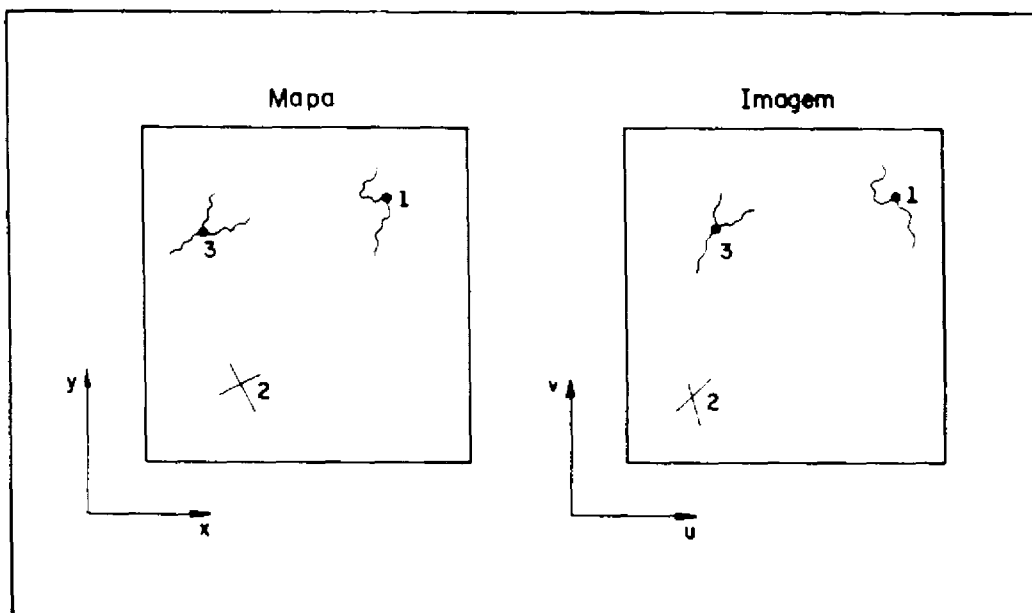


Fig. 4.4 - Definição do sistema de coordenadas cartesianas e dos pares de pontos de controle para implementação do registro de imagem.

FONTE: Richards (1986), p.51.

A primeira decisão a ser tomada no registro consistiu na definição da resolução final dos dados, de modo que se pudesse compatibilizar e criar uma base de dados única. A situação ideal seria a de manter a resolução original de 30 x 30 metros das imagens TM/Landsat-5. O tamanho dos arquivos de dados e imagens, as limitações quanto a transporte e armazenamento e, mesmo o tempo e o custo operacional de processamento digital adicional impuseram a necessidade de reduzir todos os arquivos de dados. Com isto, redefiniu-se a resolução para 60 m x 60 m, obtendo-se uma redução nos arquivos de imagens de 1/4 em relação aos originalmente estabelecidos (cada banda passou de aproximadamente 1 Mbytes para 203 Kbytes).

Esta decisão foi tomada após a análise da qualidade visual e os parâmetros estatísticos dos níveis de cinza das imagens TM/Landsat-5 com resolução espacial de 30 x 30 metros e de 60 x 60 metros. Os parâmetros estatísticos dos níveis de cinza das imagens TM podem ser visualizados na Tabela 4.2.

A partir desta tabela pode se dizer que a variação numérica dos dados é muito pequena e, portanto, não há alteração substancial dos resultados numéricos. Entretanto, em estudos onde o valor radiométrico dos dados é imprescindível para a precisão dos resultados, qualquer alteração será significativa, e um acompanhamento mais específico das variações nos valores dos dados será importante.

TABELA 4.2 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS IMAGENS
TM/LANDSAT-5 COM DIFERENTES RESOLUÇÕES ESPACIAIS

BANDAS	MÉDIAS	VARIÂNCIAS
TM1	27,04	67,36
A1	25,57	60,04
TM2	20,23	47,38
A2	18,87	47,11
TM3	36,52	168,35
A3	35,19	165,03
TM4	30,77	129,06
A4	29,24	125,43
TM5	138,05	795,47
A5	134,77	802,81
TM7	54,70	209,46
A7	53,02	202,64

TM - bandas originais com resolução espacial de 30 metros.

A - bandas registradas com resolução espacial de 60 metros.

Em relação à qualidade visual das imagens TM/Landsat-5 registradas, verificou-se que em áreas homogêneas da imagem, a perda não é grande. Mas em áreas heterogêneas, com muitas glebas de formas geométricas variadas, a perda é significativa, devido ao realce dos padrões geométricos da cena. Essa perda é ainda maior quando se faz ampliação na tela do monitor. Uma imagem original amplia-se bem até a escala de 1:25.000 ou mais, sem grandes prejuízos. Em contrapartida, na imagem com resolução espacial de

60 metros, não se faz mais que uma ampliação. Na escala de 1:70.000 já são observados os "pixels" da imagem.

Para aplicar o registro foram realizados vários testes, que resultaram na escolha de 8 pontos de controle e do polinômio de 2º grau. A resolução espacial de saída foi de 60 x 60 metros dentro de uma grade de 27 x 27 km. A Tabela 4.3 consiste no relatório do registro, onde são fornecidos os pontos utilizados, o erro médio e a precisão do registro.

Para assegurar a qualidade das imagens registradas, procedeu-se à sua entrada no SGI/INPE, com a digitalização de feições da carta planoaltimétrica (estradas, rede de drenagem). Verificou-se uma boa superposição destas feições em ambos os produtos. A carta planoaltimétrica utilizada para extração dos pontos de controle foi a da Folha Monteiro, SB-24-Z-D-IV (MI1288) da DSG/SUDENE (1985), na escala de 1:100.000.

TABELA 4.3 - RELATÓRIO DO REGISTRO DE IMAGENS

REGISTRO - Cálculo da Precisão de Registro					
Erro interno para os pontos utilizados no mapeamento					
Horizontal: 0,376		Vertical: 0,439		Total: 0,578	
Erro interno para os pontos não utilizados no mapeamento					
Horizontal: 9,421		Vertical: 6,452		Total: 11,419	
Resíduo em módulo para cada ponto					
PONTO	RESX	RESY	PONTO	RESX	RESY
01	3,1	2,6	07	0,6	0,5
02	0,3	0,3	08	1,9	3,4
03	0,3	0,4	09	0,1	0,4
04	0,5	0,9	10	0,1	0,2
05	1,7	0,3	11	0,3	0,2
06	0,5	0,0			

4.4.2 - TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS EM IMAGENS

A transformação de dados analógicos em imagens digitais no SGI/INPE baseia-se na construção de "Digital Terrain Models" (DTMs) ou Modelos Numéricos de Terreno (MNTs).

Um modelo digital de terreno é uma representação matemática que mostra a distribuição espacial de um determinado parâmetro vinculado a uma superfície real. O modelo é gerado a partir de um conjunto de amostras (X_i , Y_i , Z_i , $i = 1, 2, \dots, n$) obtidas de uma superfície real, onde X_i e Y_i representam a posição da amostra em relação, a

um sistema de coordenadas, e Z_i representa os valores determinados do parâmetro que se quer modelar, Figura 4.5.

Entre as metodologias usuais para a construção de modelos digitais de terreno estão as de Doyle (1978) e Pettinatti (1983). Não há diferenças marcantes entre ambas, apenas um detalhamento maior nesta última. O SGI/INPE adota a sistemática de Doyle (1978), a qual envolve as fases distintas de 1) aquisição de amostras e 2) geração do modelo MDT (Felgueiras, 1987).

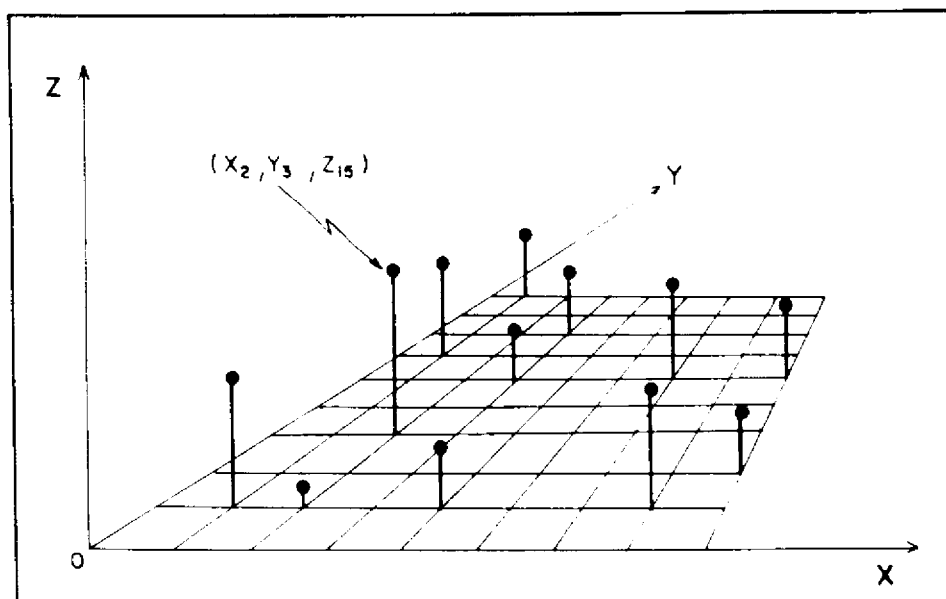


Fig. 4.5 - Amostras de pontos 3D.

Foram testados dois modos de proceder para a aquisição das amostras. No primeiro, utilizaram-se mapas de contorno, em escala de 1:100.000, para a aquisição das amostras através da digitalização manual, ponto a ponto, sobre as isolinhas, conforme citado anteriormente (Seção 3.2.3, pág. 39). No segundo modo, fez-se a aquisição automática, via leitura direta dos dados, na unidade de fita do SITIM-150.

1) Aquisição de amostras.

O segundo processo foi mais rápido e mais eficiente, pois o tratamento e a gridagem dos dados foi realizada com algoritmo mais versátil e num ambiente computacional de maior porte (Seção 3.2.3, pág. 38). Com isso os dados tratados forneceram uma imagem digital de melhor qualidade.

Como se tratam de dados com formatos de apresentação e armazenamento diferentes (isolinhas e grade regular), o roteiro a ser seguido para sua transformação é diferente. No primeiro, tem-se de refazer a grade e no segundo é só refinar a grade regular. Como a maioria dos dados não se encontra hoje disponível em fitas magnéticas e, muito menos, no formato de grade digital, a descrição das tarefas para obtenção das imagens geofísicas será generalizada, ao colocar os pontos importantes para efeito do modelamento e da geração de uma boa imagem. É o roteiro usado com os dados adquiridos na digitalização manual.

Antes de iniciar a aquisição das amostras propriamente dita, procedeu-se à criação da base de dados do projeto e dos respectivos planos de informação no SGI/INPE. Utilizou-se, para isto, o módulo DEFINIÇÃO/CRIAÇÃO, que consiste na definição da área de estudo (coordenadas da área, escala de trabalho) e dos planos de informação. A seguir, ativou-se o módulo ENTRADA de dados para a digitalização dos pontos amostrados.

No processo de aquisição das amostras, dois parâmetros são fundamentais, quais sejam a distribuição e a área amostrada. A qualidade final e o suporte computacional necessários à construção do modelo podem ser definidos a partir da amostragem.

Quanto à forma de distribuição, os dados amostrados podem ser classificados em irregular, semi-regular ou regular (Yoeli, 1975). Na distribuição irregular não existe ordenação entre os pontos. Nesse tipo de distribuição, procura-se a melhor definição da superfície através de alguns de seus pontos. A distribuição semi-irregular possui uma certa regularidade, notadamente, segundo uma dada direção, mas sem uma ordenação completa dos pontos.

A ordenação completa dos pontos ocorre na distribuição regular, onde cada ponto é perfeitamente definido no plano XY e forma, com seus vizinhos, polígonos regulares no espaço 2-D. São distribuições conhecidas como grades regulares (triangulares, retangulares, hexagonais etc). Dentro dessa conceituação, os dados aerogeofísicos constituem uma distribuição do tipo semi-irregular.

Independente do tipo de distribuição e da grade utilizada, a definição da área ou da região de interesse é importante. Essa definição permite delimitar a fronteira convexa válida para a interpolação de um ponto qualquer a partir dos pontos amostrados. Com isto, dá-se consistência para o valor da cota estimada do ponto. De acordo com Pettinatti (1983) a estimativa de um ponto fora da região de interesse é tida como extrapolação, e não deve ser usada quando se deseja um produto final confiável.

Após a aquisição dos dados (digitalizados ou por leitura automática de fita magnética) foi feita a edição, correção e checagem na base de dados do projeto no SGI/INPE.

2) Geração do Modelo

Esta fase permite que se faça a regularização dos dados coletados nos diferentes tipos de distribuições, segundo um modelo de grade de distribuição específica. Dois tipos de grade são utilizados na geração de modelos numéricos de terreno: a grade poligonal regular e a grade poligonal irregular (triangular). Na grade regular todos os polígonos são iguais. Na grade irregular, todos os polígonos são do mesmo tipo, ou seja, possuem o mesmo número de lados, mas não são todos iguais.

A grade irregular mais utilizada é formada por polígonos triangulares, onde os vértices dos triângulos são os pontos amostrados na fase de aquisição dos dados. A grade retangular é mais usada na geração dos modelos, pois é de fácil manipulação e apresenta melhores resultados para aplicações de visualização, em perspectiva, do modelo (Pettinati 1983). A Figura 4.6 é um modelo de grade obtida neste estudo, a partir dos dados do canal de contagem total.

Para a geração das grades, são utilizados métodos ou funções de interpolação (interpoladores). A quantidade e a diversidade de métodos de interpolação é muito grande. A sua escolha depende principalmente da natureza dos dados e do tipo de produto que se deseja obter.

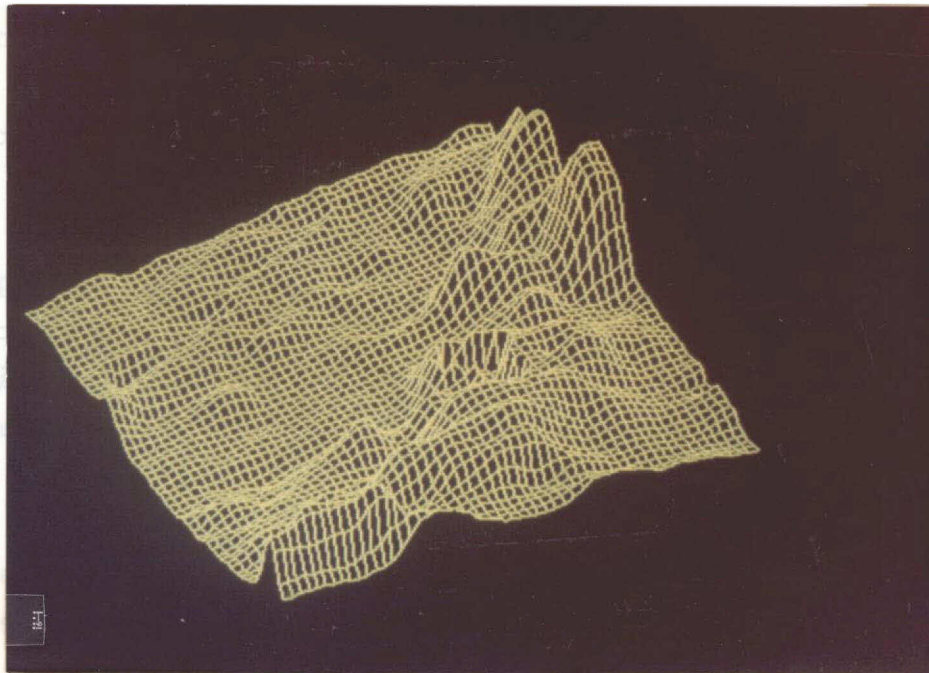


Fig. 4.6 - Modelo de grade gerado a partir dos dados de raios gama relativos ao canal de contagem total. Resolução espacial 250 x 250 metros. Visada SW-NE.

Yamamoto (1986) cita que se os dados contêm erros, tanto de medida do parâmetro como de localização, é desejável utilizar interpoladores aproximados porque, ao promover uma suavização nos dados, é possível minimizar tais erros. Entretanto, se os dados estão livres de erros e o produto final for utilizado para cálculos, devem ser empregados interpoladores exatos.

Em função da vizinhança adotada, as funções de interpolação são agrupadas em globais ou locais. As funções de interpolação global (vizinhança ilimitada) consideram e aproximam todos os pontos de uma só vez e qualquer alteração dos dados propaga-se para toda a área. Nesta classe de interpoladores, estão os que utilizam funções polinomiais com ajuste de superfícies pelo resíduo dos mínimos quadrados, e os que permitem realizar uma interpolação

exata como pelas equações multiquadráticas. No que tange às funções globais, encontram-se entre os mais comuns os métodos de triangulação, krigagem e ponderação pelo inverso da distância.

As funções locais são definidas para pequenas porções de área e assim, sucessivamente, até cobrir toda a área de interesse. Aqui, considera-se que uma alteração nos dados terá efeito localizado e dentro da vizinhança adotada.

Segundo Yamamoto (1986) os métodos mais usados, atualmente, para interpolação são os de ponderação pelo inverso da distância devido à facilidade de implementação. A maioria deles solicita do usuário o número de vizinhos mais próximos, próximos por quadrante e peso da potência a ser empregado. Estes parâmetros devem variar em função do tipo de distribuição dos dados. A definição da vizinhança, do número de pontos, do peso da potência e do número de quadrantes é feita pelo usuário.

No sistema SGI/INPE (versão 2.0), estão disponíveis intepoladores pelo inverso da distância, para a estimação da cota de cada ponto da grade regular.

3) Refinamento do modelo

Após a aquisição e geração da grade regular, ativou-se a função refinar grade do módulo MANIPULAÇÃO. Depois de fornecidos os atributos da imagem de saída, o algoritmo calcula, através de uma interpolação bilinear ou bicúbica, os valores de cota mínima e máxima da grade de entrada, dentro da região de interesse, criando um arquivo tabela que mapeia a variação dos valores de cota para a faixa de variação de níveis de cinza (0-255). Estes valores são associados a um arquivo imagem conforme definido pelo

usuário.

O cálculo das cotas de cada "pixel" da imagem foi feito utilizando o interpolador do tipo bicúbico. Na imagem de saída foram mantidos os limites da grade do projeto (27 km x 27 km) e a resolução espacial de 60 m x 60 metros.

No caso dos dados aerogeofísicos armazenados em fita magnética, procedeu-se à leitura direta na unidade de fita do SITIM-150. Posteriormente, o refinamento da grade regular evoluiu dentro de um processo bem mais rápido.

A geração de imagem a partir de MDT consiste numa aplicação de modelamento digital de dados que pode existir ou não dentro do sistema computacional que se esteja usando.

4.5 - ANÁLISE, INTEGRAÇÃO E CORRELAÇÃO DOS DADOS

De posse das imagens geofísicas e das imagens TM/Landsat-5 selecionadas, procedeu-se à entrada destes produtos no SITIM-150. Finalmente, aplicou-se a transformação por componentes principais, obtendo-se os produtos resultantes para estudo (bandas individuais e composições coloridas) e a interpretação dos resultados obtidos.

4.6 - TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo constou de uma viagem de cinco dias até a área de estudo, juntamente com o geólogo responsável pelo mapeamento geológico da Folha SB-24-Z-D-IV Monteiro, executado nos trabalhos do PLGB. Foram visitados os pontos mais acessíveis no campo e de interesse para a investigação das informações geológicas levantadas, no-

tadamente aquelas para a avaliação dos resultados e da metodologia empregada. O trabalho foi executado em novembro de 1989.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - MAPA FOTOGEOLÓGICO

A Figura 5.1 é uma fotografia do mapa de fotoanálise e fotointerpretação obtido das imagens fotográficas TM/Landsat-5. Sobre este mapa estão traçadas as diferentes zonas homólogas interpretadas com base nos elementos ou na associação de elementos e propriedades texturais de relevo e drenagem. Tais elementos diagnósticos e as respectivas propriedades fotolitológicas estão reunidas na Tabela 5.1. A Tabela 5.1 foi montada a partir de conceitos desenvolvidos e observados por autores, tais como Veneziani e Anjos (1982) e Veneziani (1987)

Foi a partir da divisão da área em zonas homólogas em propriedades texturais de relevo e drenagem, as quais refletem algumas características dos materiais superficiais imageados, que se chegou, através do processamento dedutivo e indutivo dos dados levantados e apresentados na Figura 5.1, à confecção do mapa fotogeológico da área de estudo (Apêndice A). Suas características foram analisadas e, posteriormente, correlacionadas com o conhecimento geológico mais atual e detalhado da área que é o mapa geológico da Folha SB-24-Z-D-IV, Monteiro, (Wanderley, 1990) em escala de 1:000.000.

5.1.1 - UNIDADE A

A Unidade A foi delimitada na porção sul-sudeste e norte da área de estudos. Ainda neste estudo foram diferenciadas, na porção norte, as subunidades A_1 , A_2 e A_3 .

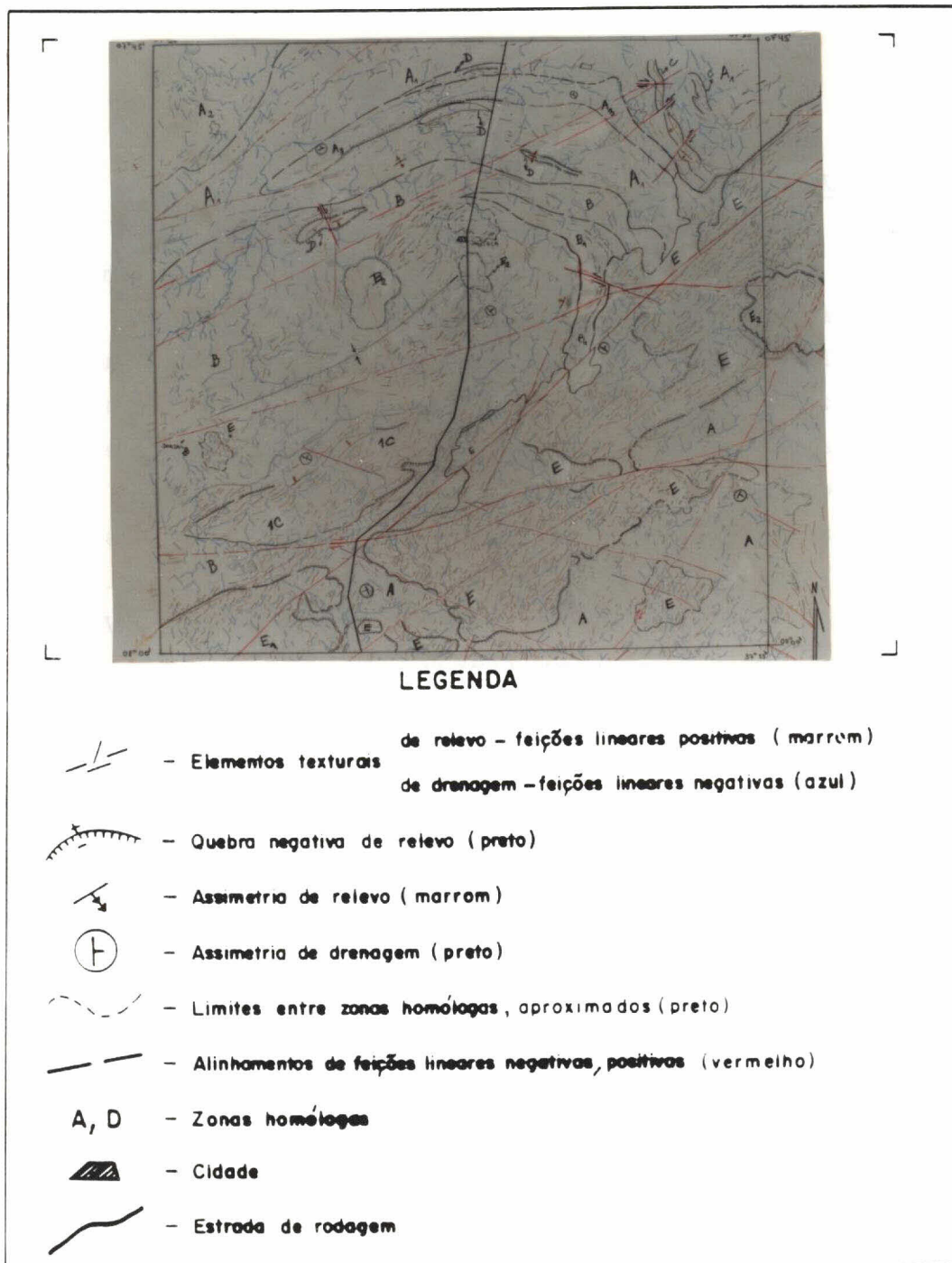


Fig. 5.1 - Fotografia do mapa de serviço que mostra os elementos de fotoanálise e fointerpretação obtidos das imagens fotográficas TM/LANDSAT - 5

As rochas que constituem a Unidade A são caracterizadas por uma razoável variedade de tipos litológicos de origens diversas agrupadas genericamente como COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO (Wanderley, 1990). Compreende as litologias consideradas mais antigas da região, que correspondem à porção inferior do Grupo Uauá, de Barbosa (1965, 1970), ou Caicó de Ferrreira e Albuquerque (1969). Predominam rochas gnáissicas-migmatíticas com intercalações de anfibolitos e biotita-gnaisses e ortognaisses tonalito-dioríticos e de composição granítico-granodiorítica.

Os ortognaisses graníticos-granodioríticos são os litotipos mais representativos deste complexo. Aflo-ram em cerca de 30% da área, mas predominantemente na porção norte (subunidade A_1 e A_3). Caracterizam-se por coloração cinza, granulação média e alternância de leitos félsicos (quartzo-feldspáticos) e leitos máficos (biotíticos e anfibolíticos). Faixas com predomínio de biotita-gnaisses, de granulação fina a média, coloração cinza, compostos por biotita, feldspato, quartzo e granada (subunidade A_3) intercalam-se na sequência, enquanto zonas mais migmatizadas, modificadas com maior ou menor homogeneização dos litotipos preexistentes, apresentam estruturas migmatíticas dos tipos schlieren, nebulíticas e estromáticas. Ocorrem em vários locais, como na porção sudeste da área, em parte da Unidade A.

A subunidade A_2 corresponde à parte do Complexo Sertânia. A falta de elementos de fotoanálise que permitissem caracterizá-la melhor e, desse modo, favorecesse correlacioná-la com os dados disponíveis, resultou no principal obstáculo para não destacar a subunidade A_2 na nomenclatura estratigráfica. O Complexo Sertânia constitui um espesso pacote de metapsamitos e metapelitos, de calcissilicáticas, calcários e anfibolitos. O litotipo predominante é um biotita gnaisse com granada, localmente xistoso,

de coloração predominantemente cinza, foliação marcante e bandamento gnáissico dado pela alternância de leitos quartzo-feldspáticos e biotíticos.

Ainda com relação a Unidade A (porção sudeste), sua área de distribuição e relações de contato com as demais unidades devem ser futuramente investigadas. Seu padrão fotogeológico distinto das subunidades da porção norte da área é sugestivo de que se tratam ou de rochas do embasamento mais migmatizado, ou de uma outra unidade lito-estratigráfica ainda não caracterizada com os dados disponíveis.

5.1.2 - UNIDADE B

Esta unidade ocupa a porção centro e sudoeste da área de estudos, tendo sido correlacionada com o COMPLEXO IRAJAÍ (Wanderley, 1990). Dentro desta Unidade B foram ainda individualizadas as subzonas B_1 e B_2 .

Conforme Wanderley (1990), o Complexo Irajá reúne rochas geneticamente distintas, sendo um grupamento de origem metavulcânica e outra metassedimentar. Neste trabalho, tais grupamentos foram englobados em uma única unidade fotogeológica, fato este que merece algumas considerações práticas.

As limitações dos produtos utilizados são muito claras quanto à resolução espacial e quanto à impossibilidade de utilização do recurso de estereoscopia. Além destas, a geometria de iluminação (posição do alvo em relação a fonte e o sensor) é outro fator que pode prejudicar os processos de fotoanálise e fotointerpretação. No caso, o azimute (118°) e o ângulo de elevação solar (55°) não são favoráveis, somando-se a isto, o nível de arrasamento da unidades em questão.

Resulta ainda que a natureza distinta dos termos vulcanogênicos e metassedimentares não é muito contrastante, no caso, para influenciar significativamente a textura e a estrutura fotográfica de modo que se pudesse discriminar essas litologias. Ocorre também que a área de ocorrência das rochas metavulcânicas é muito pequena, e seus litotipos se encontram dispersos, para serem cartografadas na escala de trabalho. A título de informação deve-se dizer que a individualização das rochas metavulcânicas durante o mapeamento da Folha Monteiro foi feita através de áreas de predominância (Figura 2.5 - pág.20) e com o uso de fotos aéreas em escala de 1:25.000.

Finalmente através da análise das assimetrias, grau e ordem de estruturação das formas de drenagem, constatou-se que a foliação/acamamento das litologias em questão apresentam-se sub-horizontalizados o que, somando-se aos outros fatores negativos, resolução espacial, ausência de estereoscopia, elevação e azimuth solares desfavoráveis e arrasamento da unidade, mostrou ser impossível individualizar os termos metassedimentares e vulcanogênicos com os produtos utilizados, pois suas propriedades fotolitológicas são praticamente indistintas.

Conforme dito anteriormente, a Unidade B foi correlacionada com as litologias agrupadas no Complexo Irajaí, definido e subdividido em duas facies distintas por Wanderley (1990). A primeira é de origem metassedimentar; a segunda compreende rochas metavulcânicas intermediárias e básicas, metagrabros e metadioritos. O Complexo Irajaí ocupa cerca de 60% da superfície da área de estudo, estando na porção central desta a sua maior área de ocorrência (Apêndice A).

As rochas metassedimentares consistem em paragnaisses a duas micas, por vezes granatíferos, de coloração cinza, granulacão fina a média, localmente com aspecto xistoso, com bandamento marcante dado pela alternância de leitos centimétricos quartzo-feldspáticos e biotíticos. São frequentes as intercalações métricas e centimétricas de calcários. Em alguns locais ocorrem níveis delgados de rochas calcissilicáticas e anfibolitos. O contato desta fácies com os ortognaisses do Complexo Gnáissico-Migmatítico subjacente, na porção norte da área de estudos, se dá pela diversidade litológica e de grau metamórfico, marcando a não-conformidade entre estas unidades. Na porção sul o contato com o embasamento ocorre por falhamento.

A fácies metavulcânica reúne litotipos de filiação vulcanogênica, intercalados concordantemente nos metassedimentos predominantemente terrígenos do Complexo Irajá. Foram individualizados ortoanfibolitos, rochas calcissilicáticas, metacherts, metatufos basálticos e metaultramáficas, além de alguns corpos de metagrabros. Os anfibolitos são as litologias dominantes, apresentando coloração verde-escura, granulacão média, algo foliados. As demais metavulcânicas são de ocorrência restrita e extensão centimétrica a métrica. Tem aspecto maciço ou bandada com coloração que varia do cinza esverdeado ao verde-escuro.

A subunidade B1 foi individualizada, neste estudo, por apresentar algumas características fotolitológicas distintas da Unidade B, notadamente pela sua maior resistência à erosão. Compreende faixas de paragnaisses (biotita gnaisses) com bandamento marcante dado pela alternância de leitos mais quartzo-feldspáticos e biotíticos.

**TABELA 5.1 - CARACTERÍSTICAS DAS UNIDADES FOTOGEOLÓGICAS
INDIVIDUALIZADAS NA ÁREA DE ESTUDO**

FATORES LITOLÓGICOS RELACIONADOS COM AS PROPRIEDADES DAS FORMAS DE RELEVO E DRENAGEM		UNIDADES	FATORES DIAGNÓSTICOS (Elementos de Fotoanálise)	OBSERVAÇÕES (Propriedades Fotolitológicas)
1ª	Resistência à erosão (Densidade de feições lineares positivas retilíneas; Forma das Encostas).	E	Encostas côncavas	mR = muito resistente, (∩)
		A,C,D,E ₁ ,E ₂	Alta frequência de pares de luz - sombra retilíneas	R = resistente, (∩)
		A ₁ ,A ₂ ,B ₁	Encostas côncava - retilínea - convexas	pR = pouco resistente, (∩)
		A ₂ ,B ₁ ,B ₂	Baixa frequência de pares de luz - sombra retilíneas	mR = não-resistente, (∩)
2ª	Permeabilidade (Densidade de drenagem).	B	Densidade alta de drenagem	mD = baixa permeabilidade
		A,B ₂ ,C	Densidade média de drenagem	D = média permeabilidade
		E,E ₁ ,E ₂	Densidade baixa de drenagem	pD = alta permeabilidade
3ª	Ruptibilidade (Grau de fraturamento/dens. de f. negativas retilíneas)	E,E ₁ ,E ₂	Alta densidade de feições lineares de drenagem transversais ao eixo maior da assimetria (de relevo e drenagem)	mF = muito fraturada; mais de 50% das feições lineares de drenagem são traços de fratura.
		A,A ₁ ,B,B ₁ ,C	Média densidade de feições lineares de drenagem transversais ao eixo maior da assimetria (de relevo e drenagem).	F = fraturada; entre 10 e 50% são traços de fratura.
		A ₂ ,B ₂ ,D	Baixa densidade de feições lineares de drenagem transversais ao eixo de assimetria (de relevo e drenagem)	pF = pouco fraturada; menos de 1% são traços de fratura.
4ª	Tropia (Densidade e grau de orientação de feições lineares de relevo e drenagem)	A,C,D	Alta densidade de feições lineares de relevo e drenagem paralelas ao eixo maior da assimetria (de relevo e drenagem)	mO = muito orientada - acamamento - foliação bem evidentes
		A,A ₁ ,B,B ₂	Média densidade de feições lineares de relevo e drenagem paralelas ao eixo maior da assimetria (de relevo e drenagem)	O = moderadamente orientada. Acamamento - foliação evidentes
		E,E ₂	Baixa densidade de feições lineares de relevo e drenagem paralelas ao eixo maior da assimetria (de relevo e drenagem)	pO = pouco orientada. Pouca informação sobre acamamento - foliação
Assimetria de Relevo e Drenagem	-	-	S = simétrico	S = simétrico
	-	-	Ausência de informação conclusiva	Ausência ou baixa densidade de feições lineares positivas (de relevo)
	-	-	Extensão e forma diferentes dos elementos texturais de drenagem em relação aos canais principais.	Fortemente assimétrica no quadrante NW
	-	-	Extensão diferente dos elementos texturais de drenagem em relação aos canais principais.	Fracamente assimétrica no quadrante SE
Quebras de Relevo			Limites definidos por quebras negativas de relevo	Contatos geológicos definidos.
Tonalidade e Textura		A ₂ ;A ₃ ;B ₁		Cc = cinza-claro C = cinza Ce = cinza-escuro

Outras propriedades da rede de drenagem analisadas foram:

Tropia = bidirecional preferencial no quadrante SE ; - Angularidade = média (ângulos retos - 60° 120°);

Sinuosidade = elementos texturais predominantemente retilíneos e localmente curvos e retilíneos (mistos) ;

Formas anômalas = duas formas foram identificadas devido ao arranjo diferente dos elementos de drenagem (disposição anelar).

A subunidade B₂ foi correlacionada com o corpo rochoso e o enxame de diques e "plugs" de metagrabros que ocorrem nas cercanias da localidade de Jabitacá (S8, S9 - Apêndice A). O corpo maior e mais a sudoeste de Jabitacá, próximo ao riacho dos Cavalos (S27), também foi verificado no campo e, embora não tenham sido identificados afloramentos, as evidências de superfície (cor e mineralogia do solo) denotam a presença de rochas básicas e de realmente tratar-se de litotipos em princípio intrusivos associados a calcários e calcissilicáticas.

5.1.3 - UNIDADE C

A Unidade C consiste em vários corpos, dispersos nos extremos nordeste e sudoeste da área de estudos, mas que tem como mais expressivo representante o corpo rochoso do granitóide da localidade de Duas Barras, na porção sudoeste da área de estudos (Apêndice A). A Unidade C foi correlacionada com os granitóides sintectônicos mapeados na área da Folha Monteiro.

Na área da Folha Monteiro, Wanderley (1990) cartografou três grandes grupamentos de rochas plutônicas, cuja divisão e posicionamento foram realizados tendo em vista as suas relações com os principais eventos tectônicos do proterozóico, atuantes dentro do Sistema Pajeú-Paraíba. Utilizou como critérios para tal separação a forma dos corpos granitóides, suas relações com as encaixantes, natureza dos xenólitos, relações petroquímicas e composição mineralógica, chegando a dividir tais grupos em granitóides sin-deformação D₁/D₂ do Proterozóico Inferior sintangenciais; granitóides sin-transcorrência e granitóides sin a pós-transcorrência (D₃) do Proterozóico Superior (Ciclo Brasileiro).

Os granitóides sintangenciais são rochas polideformadas, subconcordantes a concordantes com as encaixantes e desenvolvem bandamento gnáissico acentuado. Consistem em augenortognaisses, ortognaisses granodioríticos (porção nordeste da área) e de ortognaisses quartzo-monzoníticos (granitóide da localidade de Duas Barras - porção sudoeste da área), além de sienitos foliados não aflorantes na área de estudo. Apresentam foliação pré-territa com mergulho suave, posteriormente dobrada em eventos mais recentes.

Os litotipos granodioríticos apresentam coloração cinza-amarelada, textura fanerítica fina, bandamento gnáissico com foliação bem desenvolvida, definida pela orientação de biotita e anfibólios, sendo compostos por plagioclásio, microclina, hornblenda, biotita, quartzo e tendo como acessórios titanita, apatita e clorita. O granitóide da porção sudoeste tem coloração cinza, textura fanerítica fina, equigranular, estrutura gnáissica, com foliação marcante e dobrada.

5.1.4 - UNIDADE D

Esta unidade é a que possui menor distribuição em área, restringindo-se à três pequenos corpos na porção norte próximo aos riachos da Volta (dois corpos) e dos Cavalos, definido neste estudo (Apêndice A).

Os litotipos desta unidade foram correlacionados com os granitóides considerados sintranscorrentes à deformação do Ciclo Brasileiro. São rochas de coloração cinza-rósea, textura fanerítica fina, equigranular, com foliação bem marcante dada por bandas miloníticas ou por aglomerados de quartzo e orientação de micas. A assembléia mineralógica reúne oligoclásio, microclina, quartzo, biotita, moscovita, clorita e acessórios. Embora não se tenha

observado no campo dobramentos de foliações mais antigas, possivelmente paralelizadas e/ou mascarada pela foliação relacionada ao evento transcorrente posterior, o granitóide do riacho dos Cavalos, por suas características magnéticas, pode ser uma rocha sintectônica aos eventos mais antigos, de modo semelhante aos granitóides da Unidade C.

5.1.5 - UNIDADE E

Do mesmo modo que as unidades anteriores, a individualização da Unidade E baseou-se essencialmente nas propriedades de relevo e drenagem e nos fatores litológicos e estruturais, tendo sido correlacionada com os granitóides sin a pós transcorrência na região. Dentro da unidade foram ainda individualizadas as subunidades E1 e E2.

Os granitóides sin a pós-transcorrência têm formas alongadas e dimensões batolíticas, são comumente isotrópicos e mostram acamamento ígneo marcado por cristais de feldspato orientados e não deformados. São representantes típicos destas litologias o granitóide do tipo Conceição e o granitóide do tipo Itaporanga, (Almeida, 1967).

Os granitóides do tipo Conceição têm maior área de representação, ocupando a porção SE, intrudidos discordantemente nos ortognaisses do Complexo Gnáissico-Migmatítico e nos paragnaisses do Complexo Irajá. Na porção SE ocorre corpo alongado com cerca de 150 km² de área, que se estende desde o riacho do Saquinho ao sul, passando pelo riacho Mulungu e, saindo no extremo nordeste num total de 30 km de extensão (Apêndice A). A coloração destes litotipos varia de cinza a rósea, textura fanerítica fina a média, inequigranular e apresentam fenocristais de K-feldspato. Nas bordas do corpo desenvolve-se foliação penetrativa, enquanto na porção central foram identificadas estruturas do tipo bandamento ígneo. Os tipos petrográficos

encontrados na Unidade E são rochas granitóides de cores que variam do cinza claro ao róseo, textura inequigranular, fina a média, porfirítica e eventuais tipos mais finos, de composição mineralógica predominantemente granítica-granodiorítica e monzogranítica. Os demais representantes da Unidade E ocorrem na porção sudeste e sudoeste da área, próximo ao riacho dos Campos, dentro do Complexo Gnáissico-Migmatítico e, no canto oeste, próximo à cidade de Irajá, dentro do complexo homônimo.

As subunidades E₁ e E₂ têm como representante mais típico o granitóide do Serrote do Caracol (porção leste - E₂) e da localidade de Serra Branca (porção sudoeste - E₁) dentro da área de estudo. Em que pese haver alguma foliação desenvolvida nas bordas destes granitóides, estes mostram-se de caráter tardio em relação ao evento tectônico transcorrente e, como será visto mais adiante, também apresentam características geofísicas distintas de suas congêneres da Unidade E.

Correspondem ao granitóide do tipo Itaporanga, encontrando-se intrudido discordantemente nos ortognaisses do Complexo Gnáissico-Migmatítico. São rochas de coloração cinza, textura inequigranular porfirítica, com frequentes enclaves de rocha máfica de tamanhos variados e xenólitos de ortognaisses do embasamento. Possuem foliação incipiente nas bordas dos corpos e alinhamentos de K-feldspato e ou minerais micáceos.

Os litotipos da subunidade E₂ possuem (ponto S21) coloração rósea, granulação grosseira a média, homogênea, isotrópica, eventualmente com xenólitos de rocha máfica rica em biotita, desenvolvendo pórfiros de K-feldspato e uma esfoliação esferoidal típica.

5.1.6 - ESTRUTURA E DEFORMAÇÕES

Durante o processo de fotoanálise, obteve-se um conjunto de dados através do estudo das propriedades dos elementos texturais, que serviram para caracterizar as diferentes zonas homólogas e as propriedades das formas, fundamentais para a interpretação da estrutura e das deformações da área de estudos. Como não foi possível realizar um estudo mais amplo que permitisse caracterizar e posicionar a área dentro de um contexto geotectônico regional, optou-se por apresentar uma descrição dos elementos e formas observadas nas imagens fotográficas que, complementadas e correlacionadas com os dados de campo, possibilitaram a descrição da estrutura geológica da área de estudos.

De acordo com Wanderley e Torres (1990) esta região foi afetada por três fases de deformação, desde o arqueano até o Proterozóico Superior através da orogênese Brasileira. Neste estudo, o que se verificou após a fotoanálise é que das três fases de deformação citadas por aquele autor, apenas a última tem representação mais evidente nos produtos fotográficos utilizados.

A primeira fase de deformação não está bem caracterizada por não apresentar em superfície, através das propriedades texturais e estruturais de relevo e drenagem, os elementos que permitissem seguramente identificá-la nos produtos de sensoriamento remoto. Atribui-se tal fato, à ausência de grandes registros de dobramentos em macroescala, produzidos pela deformação denominada (D_1/D_2), que, associados à atuação dos eventos posteriores (D_3), encontram-se obliterados nas suas feições estruturais e, consequentemente, sem apresentar elementos diagnósticos ao nível dos produtos utilizados.

No campo essa deformação mais antiga é representada por um bandamento gnáissico impresso nos ortognaisses do embasamento, sendo marcado pela alternância de bandas claras (leitos de quartzo e quartzo-feldspáticos) com leitos escuros de bandas máficas ricas em biotita e anfibólios, de espessura e extensão variadas, bem evidenciados pelas litologias reunidas nas Unidade A_1 e A_3 , na porção norte da área de estudos. Nesta porção os mergulhos indicados por esse bandamento são da ordem de 30° graus para sul-sudeste.

Da mesma forma que a fase de deformação D_1 , a fase D_2 , (D_1/D_2), encontra-se muito modificada e somente alguns dobramentos menores que, em parte guardam um pouco da sua geometria original, puderam ser indicados na porção central e sul da área, próximo de Jabitacá e do granitóide da região de Duas Barras. Nestes locais, os elementos texturais de relevo encontram-se com disposição regular, fortemente estruturados, ao contrário do restante da área, principalmente da Unidade B, cuja disposição irregular torna impossível uma ordenação e melhor caracterização dos dobramentos relacionados a esta fase de deformação. Nos locais citados a organização complexa dos elementos texturais de relevo e drenagem (alinhamentos e curvaturas de drenagem e de feições lineares de relevo) revelam formas estruturais interpretadas como redobramentos, relacionada a esta fase de deformação.

Esta deformação caracteriza-se, no campo, por uma xistosidade que na maioria dos casos atribui-se a uma superfície $S_1 + S_2$ ligada aos eventos $D_1 + D_2$ (Wanderley, 1990). Em alguns locais, observou-se alguma relação angular entre S_1 e S_2 e no caso, S_2 caracteriza-se por uma clivagem de crenulação e mais raramente dobras F_2 recumbentes que afetam o acamamento transposto, já com foliação paralela (S_0, S_1). As dobras atribuídas a D_2 têm caimento médio a

fraco, ora para norte-noroeste (parte sul da área) próximo e dentro do granitóide Duas Barras, ora para sul-sudeste (parte norte da área).

O último evento de deformação caracterizado foi correlacionado aos eventos da orogênese brasileira. Caracteriza-se pela ampla estrutura sinformal, simétrica, com plano axial de direção NE-SW e eixo com caimento médio para sudoeste. Esta feição estrutural destaca-se pela forte estruturação do relevo (disposição regularmente ordenada-fortemente estruturada) e da rede de drenagem (ordenada, com forte assimetria para noroeste, a partir do cinturão de rochas granitóides da Unidade E. A foliação penetrativa denota a forte superimposição e retrabalhamento das superfícies mais antigas (Sn/S1/..). As atitudes desta foliação medidas no trecho sul do perfil da estrada Sertânia-Jabitacá, na borda de contato dos granitóides (Unidade E) com o Complexo Irajá (Unidade B), mostram para esta estrutura valores da ordem de 20° a 30° graus para norte-noroeste, passando a sub-horizontal na porção central da área. A partir de Jabitacá, invertem para sul-sudeste e são da ordem de 30° graus.

Após a confecção do mapa fotogeológico, tiveram início os trabalhos de análise dos dados aerogeofísicos, cujos principais resultados são descritos a seguir.

5.2 - CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA E CORRELAÇÃO GEOLÓGICO-GEOFÍSICA.

5.2.1 - CARACTERIZAÇÃO MAGNETOMÉTRICA

A Figura 5.2 mostra a imagem de níveis cinza obtida a partir dos dados de campo magnético total, juntamente com o respectivo mapa de interpretação. No mapa, estão delimitadas cinco zonas magnéticas principais (F, G, H,

I e J) e duas subzonas menores (F_1 , I_1). A delimitação destas zonas ocorreu em função do relevo magnético ser mais ou menos movimentado e obedeceu às quebras ou inflexões negativas de relevo. As inflexões negativas constituem, portanto, os contatos entre áreas com diferentes contrastes magnéticos.

Na porção centro-oeste da área observa-se que o relevo magnético é baixo, suave ondulado com a configuração de uma calha, aqui denominada zona F (Figura 5.2). Por sua amplitude e pelo comprimento de onda, a zona F foi interpretada como reflexo de um embasamento magnético, ou rico em intrusões básicas e/ou graníticas também magnéticas. Por estar recoberto por metassedimentos e metavulcânicas do Complexo Irajá, não-magnéticas, mostra em superfície esse relevo magnético suave ondulado. Como a parte central da zona F é mais clara que as suas bordas (níveis de cinza de valores mais altos), pode-se inferir que o embasamento é ainda mais profundo neste local. A extensão e a forma da zona F corresponde, em superfície, à área de afloramento das litologias do Complexo Irajá (Unidade B - Apêndice A), notadamente à das rochas metavulcânicas, o que denota um aparente controle do substrato sobre a ocorrência destas litologias.

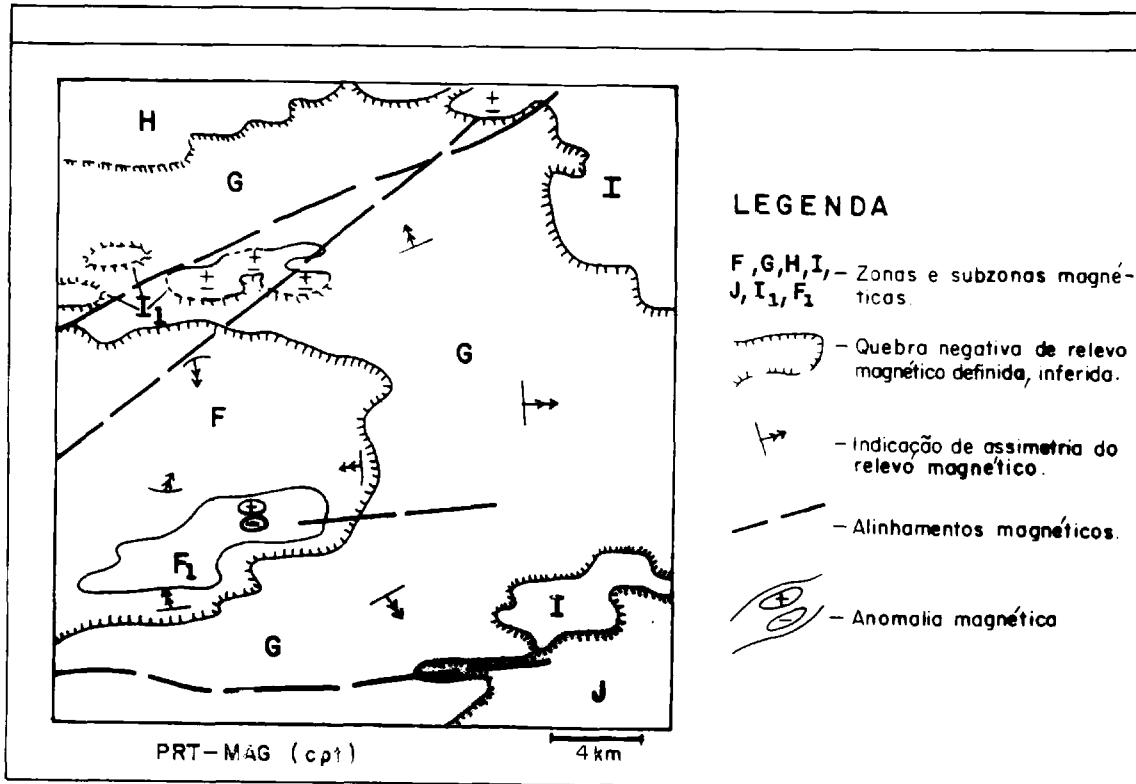


Fig. 5.2 - Imagem digital de níveis de cinza obtida dos dados de campo magnético total e respectivo mapa de interpretação.

O relevo suave da zona F é perturbado, ao sul, por uma anomalia magnética que tem relevo mais movimentado e constitui o que se designou de subzona F₁. Esta subzona será motivo de discussão mais adiante.

A zona G configura-se como um semicírculo que se inicia no extremo NW, segue bordejando externamente a zona F por todo setor centro e centro-leste, infletindo para SW na porção sul da área de estudo. Esta geometria é reforçada pela suave assimetria de relevo, indicada pelos dados e assinalada no mapa de interpretação (Figura 5.2). Em relação ao terreno, a zona G engloba rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (Unidades A, A₁, A₂ e A₃), do Com-

plexo Irajá (Unidade B), e quase a totalidade das rochas granitóides (Unidades D, E, E₁ e E₂) da área de estudos (Apêndice A). O comportamento magnético suave e relativamente homogêneo da zona G não permite subdividi-la ou detalhá-la, em relação as litologias em superfície.

A zona H foi individualizada no extremo NW da área, sendo caracterizada por um relevo magnético monótono, alto, plano a suave ondulado e com caimento geral na direção N-NW (Figura 5.2). Nesta porção da área ocorrem litotipos mapeados como do Complexo Sertânia (Wanderley, 1990), mas que, por estarem no limite da área e com pouca expressão em superfície, ficaram sem uma melhor caracterização magnetométrica e, conseqüentemente, sem uma melhor correlação geológico-geofísica.

A zona I aparece na porção nordeste e sudeste da área, conforme mostra a Figura 5.2. Apesar de separada, deve-se notar que as características de amplitude, comprimento de onda, intensidade, distribuição e forma das anomalias são muito semelhantes, daí porque se colocou a mesma designação de zona I em ambos os locais. O relevo mais movimentado da zona I, na porção nordeste da área, foi atribuído à presença de rochas granitóides do regime sintangencial que afloram como cordões nas cercanias do Serrote Celado e do sítio Varginha, (Unidade C - Apêndice A). Na porção sudeste da área, a causa pode ser a mesma, embora não tenha sido cartografado nenhum tipo de rocha granitóide sintectônica naquela área.

A zona J tem valores magnéticos baixos. Está situada na porção sudeste da área e relaciona-se, em superfície, com a área de ocorrência de rochas do Complexo Gnáissico-Migmatítico (Unidade A), mas sendo mais magnéticas que suas correlatas na porção norte da área (Unidades A₁ e A₃ - Apêndice A). O corpo granítico cartografado neste

setor, próximo do riacho dos Campos (Unidade E - Apêndice A), foi considerado como causador do baixo magnético detectado. Caso contrário, esse comportamento mais magnético e distinto das litologias da porção norte apenas reforça a observação, feita na fotointerpretação, de que as litologias da porção sudeste da área podem não pertencer ao Complexo Gnaíssico-Migmatítico (Apêndice A).

Na porção noroeste da área, próximo do contato das zonas F e G, o relevo magnético apresenta-se como uma série de anomalias de pequena amplitude e comprimento de onda, semelhantes às da zona I, mas de maior intensidade, aqui reunidas como zona I_1 (Figura 5.2). Da mesma forma que na zona I, a presença de um corpo de rocha granítica mapeado como do regime sintranscorrência, próximo ao riacho dos Cavalos (Unidade D - Apêndice A), permite interpretá-lo como o causador deste relevo mais movimentado no local.

A Figura 5.3 resume a observação das zonas magnetométricas descritas através do seu realce, com vista em perspectiva, mostrando a textura e o relevo dos dados de campo magnético total.

A subzona F_1 , constitui a principal anomalia magnética da área de estudos. Foi relacionada à ocorrência do granitóide da localidade de Duas Barras (Unidade C - Apêndice A), tendo sido objeto de estudo por Silva e Veneziani (1988), que analisaram o comportamento da anomalia a partir de perfis do mapa de contorno de campo magnético total. Concluíram que tratava-se de um corpo tabular, possivelmente preenchendo fraturas, com mergulho para o norte, localizado dentro ou próximo do contato do granitóide com as litologias do Complexo Irajá (Unidades C e B - Apêndice A).



Fig. 5.3 - Imagem de campo magnético total que mostra a textura e o relevo dos dados. Visada sul-norte.

Teve-se acesso a um local que poderia apresentar alguma evidência em superfície; entretanto, os indícios consistem em fragmentos e pequenos blocos de rocha muito alterada e pouco magnética, insuficiente para indicar tal anomalia. O local é um vale recoberto por material arenoso e areno-argiloso de terraço de inundação, com vegetação densa de médio porte.

Embora os resultados não tenham sido satisfatórios, procedeu-se ao modelamento dos dados de campo magnético total no computador, para a obtenção do perfil calculado do corpo causador da anomalia magnética (Figura 5.4), pois esta anomalia, conforme será visto mais adiante, tem importância mineralogenética no contexto da área de estudos. A condição formulada para o cálculo foi a de que o corpo é aflorante e com raiz até a profundidade de 2 km. Obteve-se, para a anomalia, uma largura de 1,4 km e suscep-

tibilidade magnética de 0,002 e.m.u. Com este resultado conclui-se que o próprio granitóide é a causador da anomalia.

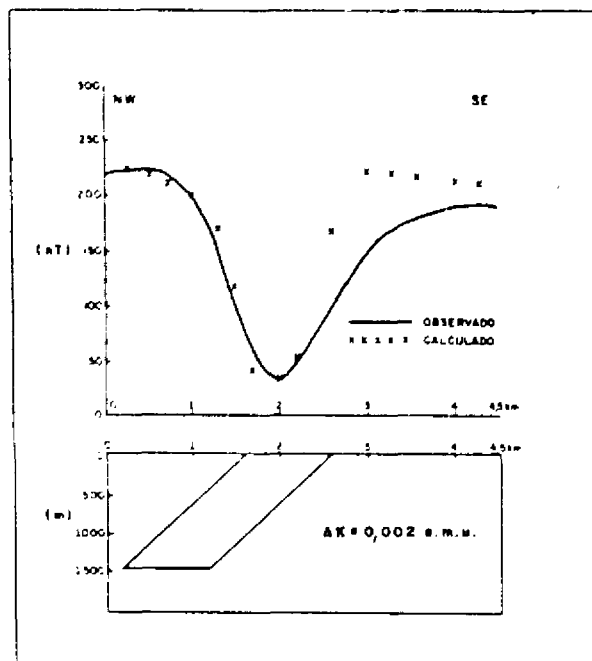


Fig 5.4 - Perfil do campo magnético total, calculado e observado em seção transversal ao granitóide da região de Duas Barras.

5.2.2 - CARACTERIZAÇÃO GAMAESPECTROMÉTRICA E OS INDICADORES METALOGENÉTICOS POTENCIAIS

Antes de entrar na discussão dos resultados obtidos, é oportuno fazer duas considerações principais acerca dos dados utilizados, para que se possa situar melhor o caráter e as restrições da interpretação e da correlação geológico-geofísica estabelecida.

De acordo com o que foi discutido anteriormente (Seção 3.2.2 - pág. 35), os dados aerogeofísicos não são preparados para que se possa referi-los em termos quantitativos de unidades ppm, e, com isto, buscar uma aná-

lise mais relacionada com a origem e a composição mineralógica dos litotipos aflorantes. Além disto, não se dispõe de dados específicos de laboratório e de campo em número suficiente (estruturais, petrográficos, litoquímicos etc.) para avançar nas proposições feitas. Assim, a discussão é qualitativa, procurando realçar a correlação espacial dos dados e o aprimoramento da cartografia geológico-geofísica através da definição de elementos que propiciem aprofundar, no futuro, trabalhos desta natureza. Portanto, o objetivo, no momento, é de lançar mão das idéias e dos dados disponíveis para, nesta primeira abordagem, indicar este potencial a ser melhor estudado, inclusive integrando outros tipos de dados como o modelo de elevação do terreno, litoquímicos, geoquímicos e outros.

A composição colorida do urânio, do potássio e do tório (eU R - K G - eTh B) da Figura 5.5 mostra que a área de estudos pode ser dividida em três grandes zonas gamaespectrométricas principais, denominadas K, L e M no mapa de interpretação. Além destas, algumas zonas menores com valores gamaespectrométricos muito baixos (P), ou muito altos (M_1 , M_2 e M_3), também foram identificadas. Zonas com predomínio de um ou dois radioelementos ainda estão indicadas no mapa de interpretação com a abreviatura de suas respectivas cores na composição colorida da Figura 5.5 (Amarelo - Am, Azul - Az, Ciano - Co e Magenta - Ma).

A delimitação destas zonas na área de estudos foi possível porque, na composição colorida da Figura 5.5, a imagem é dominada pelo matiz do verde, o que indica um predomínio do canal do potássio para toda a área, mas com diversos níveis de saturação, ou seja, com diferentes proporções na concentração deste radioelemento na superfície em relação aos demais, o urânio e o tório.

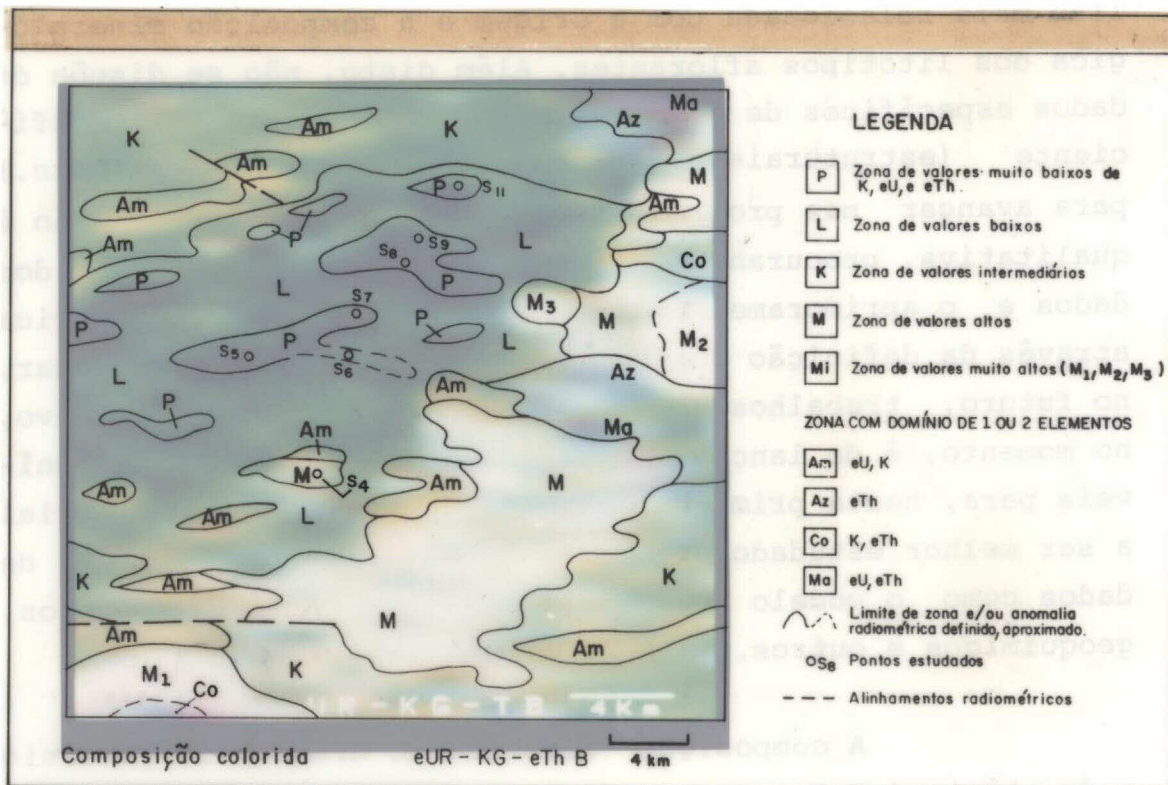


Fig. 5.5 - Composição colorida eU R - K G - eTh B das imagens obtidas dos dados gamaespectrométricos com o respectivo mapa de interpretação.

Para uma região como a do Nordeste brasileiro este era um resultado previsível. O potássio é o mais abundante dos três radioelementos e é nas rochas ácidas que ocorrem os mais altos valores (Tabela 3.3, pág. 34). O potássio é encontrado, principalmente, em álcali-feldspatos, micas e feldspatóides. O urânio e o tório são encontrados em quantidades traços em minerais maiores, tais como o quartzo e feldspatos, e só são encontrados em maiores quantidades em pequenos grãos de minerais acessórios como monazita e zircão (Galbraith e Saunders, 1983). A maior parte dos terrenos pré-cambrianos do nordeste oriental brasileiro é dominada por rochas ácidas, submetidas que foram a intenso retrabalhamento e migmatização no Ciclo Brasileiro, e tal informação vem apenas confirmar os resultados obtidos.

A zona K ocupa todo o setor norte, sul e sudeste da área (Figura 5.5). Esta zona é dominada pelos matizes de amarelo e verde, o que indica o predomínio do urânio e do potássio. Comumente esta zona corresponde, em área, ao Complexo Gnáissico-Migmatítico mapeado nos setores norte e sudeste (Unidades A, A₁, A₂ e A₃, Apêndice A). No setor sudoeste seus limites se confundem com os paragneisses do Complexo Irajá (Unidade B, Apêndice A).

A zona L ocupa a porção central e oeste da área de estudos, caracterizando-se pelo matiz dominante do verde, indicativo da pronunciada ausência do urânio e do tório. Nesta zona também se observa uma série de manchas pretas intercaladas, indicadas pela letra P. As manchas pretas representam os locais de mais baixas concentrações em radioelementos, cujos valores são próximos do zero (Figura 5.5).

Um dado importante da zona L consiste no fato de que na porção norte da área o matiz do verde prossegue, ainda que tênue, para nordeste, tornando sugestiva a sua continuidade naquela direção. Contudo, observa-se que faltam as subzonas ou manchas pretas que melhor caracterizam a zona L, daí porque foi mantida a separação da zona K mais ao norte (Figura 5.5) e a sua correlação com o Complexo Irajá (Unidade B - Apêndice A).

A justificativa encontrada para definir as sub-zonas pretas (P) considera a composição mineralógica original (ambiente primário) das litologias metavulcânicas reunidas no Complexo Irajá, enquanto uma segunda possibilidade está ligada ao ambiente secundário controlado pelas condições de superfície. As rochas metavulcânicas são de caráter intermediário a básico, e subordinadamente ultrabásico. No conjunto são, teoricamente, menos potássicas e menos radioativas. Admitindo-se que estas litologias man-

tiveram sua composição química parcialmente preservada e não se enriqueceram em radioelementos sob as condições tectonometamórficas dos eventos que afetaram a região, isto representa, na prática, um argumento importante para que tais litologias se apresentem com baixos valores gamaespectrométricos. A ocorrência no campo (pontos S32 a S36, S8 - Figura 5.5 e Apêndice A) de metatufos basálticos e metagabros com estruturas primárias preservadas (acamamento ígneo) é reforçada pelos resultados analíticos (Wanderley, 1990) que revelam que as rochas vulcanogênicas são, mineralogicamente, os litotipos mais bem preservados dentro do citado complexo e servem para corroborar com a interpretação fornecida. No campo a presença de tais litologias também foi confirmada nos afloramentos S1, S2 e S3 dentro do Complexo Irajá (zonas P - Figura 5.5 e Unidade B - Apêndice A), o que demonstra haver pouca interferência do meio físico (dissolução, erosão e transporte de material) sobre tais litologias, em particular, nesta área. Noutros locais, pode se esperar e chegar a resultados diferentes.

A zona M possui coloração esbranquiçada e ocupa a porção sudeste da área de estudos (Figura 5.5). Ela tem direção geral NE e superpõe-se em parte às rochas granitóides da Unidade E (Apêndice A). Dentro da zona M foram distinguidas as subzonas M_1 , M_2 e M_3 que, por serem mais claras (valores de níveis de cinza mais altos), mostram exatamente um maior equilíbrio nas concentrações do urânio, do potássio e do tório. Por seus valores mais elevados estas subzonas (M_1 , M_2 e M_3) constituem as anomalias gamaespectrométricas da área de estudos e foram correlacionadas com a presença das rochas granitóides colocadas como resultantes da atividade magmática tardi a pós-transcorrência da região.

O comportamento gamaespectrométrico distinto dentro dos granitóides sin a pós-transcorrência, zona M e zonas M1 e M2, suscitou a investigação de possíveis variações dentro de uma mesma rocha e qual a importância prática de que tal possibilidade venha a ser um fato.

Variações nas concentrações de eU e eTh e, por conseguinte, nos valores da razão eU/eTh, têm sido empregadas na classificação de rochas ígneas e sedimentares (Galbraith e Saunders, 1983) e são consideradas como indicadores litogeoquímicos úteis em áreas especializadas em elementos granófilos e depósitos associados dentro de rochas graníticas (Matolín, 1984). Maurice e Charbonneau (1987) utilizam os dados analógicos do eU e eTh e da razão destes radioelementos, juntamente com os dados de magnetometria, para classificar rochas granitóides e identificar corpos potencialmente mineralizados em urânio e/ou mineralizações de elementos granófilos, Mo, Sn, W, Au, Be, Nb e Li.

A Figura 5.6 mostra a imagem da razão eU/eTh com o respectivo mapa de interpretação. De um modo geral, o que se tem nesta imagem são áreas claras e escuras, respectivamente, de altas e baixas razões eU/eTh.

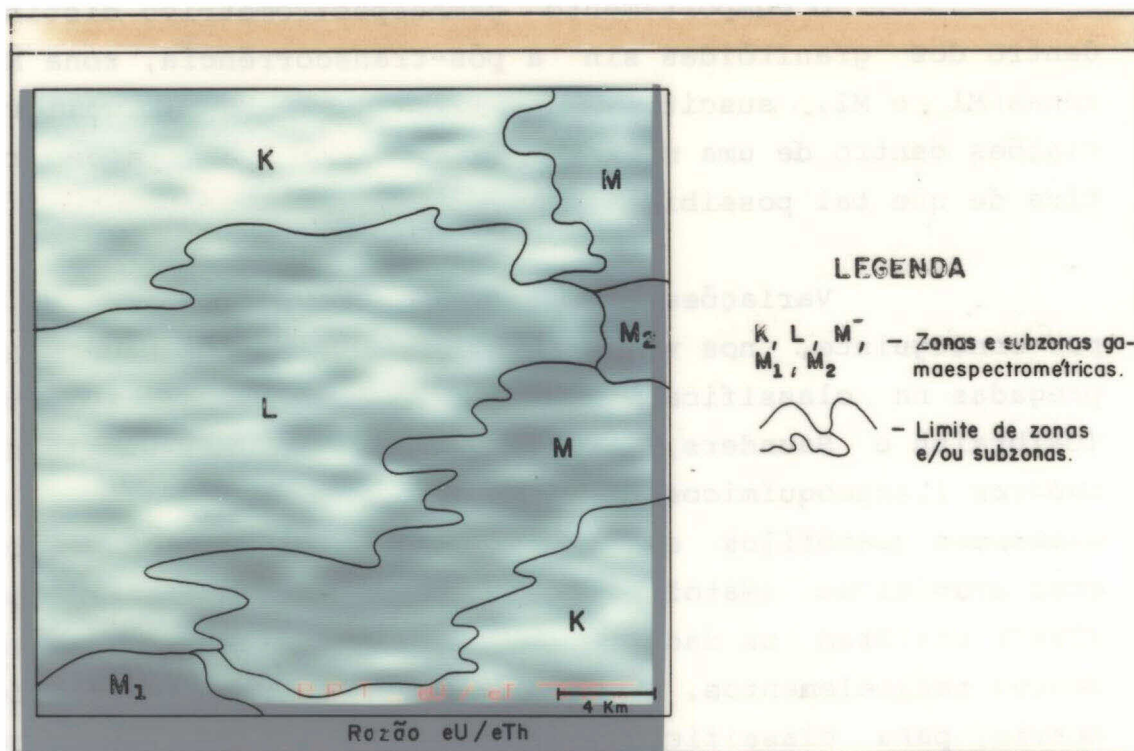


Fig. 5.6 - Imagem digital de níveis de cinza da razão eU/eTh .

Nota-se que, apesar de os contatos não ficarem bem definidos e de haver muita variação interna, a área de ocorrência das rochas granitóides sin a pós-transcorrência (Unidade E - Apêndice A e Zona M - Figura 5.5) podem ser inferida pelas baixas razões eU/eTh , as quais são ainda mais baixas sobre as rochas granitóides das zonas E₁ e E₂ delimitadas como zonas M₁ e M₂ (Figuras 5.5 e 5.6).

Na zona M os radioelementos urânio e tório têm altos valores de radioatividade (64 cps e 130 cps, respectivamente) e variam demonstrando uma certa correlação positiva com toda a área. Tal relação entre o urânio e tório fica modificada quando se analisa a zona M₂. Esta zona mostra características de concentração diferente para estes

radioelementos, havendo enriquecimento na concentração do tório da borda norte para a sul de 150 a 195 cps e o inverso para o urânio que varia de 40 a 80 cps da borda sul para a norte. Embora o intervalo de alteração seja pequeno comparando com os valores de contagem total, ele caracteriza uma variação espacial na distribuição dos radioelementos, sugestiva de mudanças e diferenciação durante o processo de formação dessas rochas e com reflexo na composição mineralógica do granitóide da localidade do Serrote do Caracol (Unidade E_2 - Apêndice A), ainda não totalmente esclarecida com os dados de campo. O canal de contagem total e o do potássio também enriquecem da borda sul para a norte, de 1750 a 2750 cps e 125 a 170 cps, respectivamente.

Um outro local onde se verifica esse tipo de variação é na porção sudoeste da área (zona M_1 - Figura 5.6). A parte interna desta zona revela-se, em parte, mais rica em potássio e tório (ciano na composição colorida dos radioelementos, Figura 5.5), em parte, em urânio e tório (magenta na composição colorida da Figura 5.5). Neste local ocorre uma mudança de litologias cartografadas como paragneisses do Complexo Gnáissico-Migmatítico, fazendo contato ao norte com o granitóide sin a pós-transcorrência da subunidade E_1 . Com este resultado pode-se validar a interpretação anterior e mostrar que, nem toda alteração nos dados gamaespectrométricos está ligada à variação composicional na rocha. Ela também pode estar relacionada a outro tipo de rocha e às mudanças introduzidas por fatores externos como a erosão e o transporte dos materiais superficiais. O que se quer dizer com isto é que noutros locais da área de estudos, ou em outras regiões, onde se faça a separação de pequenas subzonas com comportamento gamaespectrométrico diferenciado (Figura 5.5), baseada em um ou na associação de dois elementos, estas zonas carecem de estudos de campo para confirmar as alterações. De qualquer modo estes resultados demonstram o potencial dos dados e das

técnicas empregadas, e podem servir, no futuro, para orientar melhor os trabalhos e as amostragens de campo. O que falta nestas imagens geofísicas é superpô-las a algum produto fotográfico ou a um mapa da área para orientar os caminhamentos e a localização dos pontos no campo. Isto foi feito a partir de slides fotografados das imagens na tela do monitor de vídeo e projetados no PROCOM-2 diretamente sobre a carta planoaltimétrica da área, ou, como se verá mais adiante, combinando estes produtos com as imagens componentes principais TM/Landsat-5.

O potencial discutido pode ser evidenciado quando se retoma a discussão sobre o granitóide da região de Duas Barras. Embora não fique bem delimitado pelos dados de gamaespectrometria (área em torno do ponto S_4 - Apêndice A), o que demonstra uma provável falta de homogeneidade na rocha, este granitóide apresenta zona de enriquecimento e correlação positiva para todos os radioelementos (pequena subzona M, próximo do ponto S_4 - Figuras 5.5 e Apêndice A), contagem total elevada (1.750 cps) e baixas razões eU/eTh , além de ser magnético, conforme já discutido anteriormente.

De acordo com Maurice e Charbonneau (1987), com tais características, os dados aerogeofísicos permitem que este granitóide (granito quartzo-monzonito) possa ser classificado como do tipo I a magnetita - Série a magnetita (biotita-hornblenda-granito, subalcalino). Tais litologias têm potencial para abrigar mineralizações de cobre, molibdênio e ouro, como é o caso, por exemplo, na região de Sandybeach Lake, nos territórios do noroeste do Canadá. Segundo Maurice e Charbonneau (1987), naquela região, as rochas calcissilicáticas com scheelita e uma variedade de sulfetos que bordejam o granitóide estão mineralizadas e constituem uma jazida de ouro de grande porte. Ao analisar os dados disponíveis sobre o granitóide da região de Duas Barras, verifica-se que, além da classificação, ocorrem ro-

chas calcissilicáticas e metavulcânicas na borda norte do granitóide, que entre as rochas granitóides da área da Folha Monteiro ele é quem apresenta os mais altos teores em cobre, e as únicas anomalias de ouro da Folha foram detectadas em concentrados de bateia e sedimentos de corrente (Wanderley, 1990) na rede de drenagem que nasce e secciona todo o corpo rochoso. Na teoria, isto configura um ambiente prospectivo nas cercanias deste granitóide. Para investigar tais informações é necessário abrir picadas e executar perfis geológicos no local. Em razão da exiguidade de tempo de campo, e como foge dos objetivos do presente estudo, não foi possível realizar tal investigação na época.

Na Tabela 5.2 é apresentada uma síntese de toda discussão dos dados aerogeofísicos onde se resumem as principais características geofísicas que permitem individualizar diferentes zonas/subzonas geofísicas e correlacioná-las com as unidades/subunidades fotogeológicas, litológicas e litoestratigráficas da área de estudo.

É preciso salientar que toda a interpretação geofísica foi feita utilizando exclusivamente os padrões das imagens geofísicas individuais e da composição colorida para depois interpretar os dados e produtos aerogeofísicos (mapas de contorno), a fim de comparar os resultados. Com os dados, montou-se a Tabela 5.2 e, no caso específico dos dados de magnetometria, os intervalos adotados para definir as classes de amplitudes magnéticas basearam-se nos estabelecidos por Azevedo et al. (1990) para a área da folha Monteiro.

TABELA 5.2 - CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS DAS LITOLOGIAS DA
ÁREA DE ESTUDO

INFORMAÇÃO GEOLÓGICO-GEOGRÁFICA					CARACTERÍSTICAS GEOFÍSICAS						
					GAMASPECTROMETRIA				MAGNETOMETRIA		
UNIDADE FOTOGEOLÓGICA		UNIDADE LITO-ESTRATIGRÁFICA	LITOLOGIA	ÁREA/LOCAL DE OCORRÊNCIA	CONTAGEM TOTAL (cps)	POTÁSSIO (cps)	URÂNIO (cps)	TÓRIO (cps)	RAZÃO eu/eTh (cps)	eUR-KG-eThB	CAMPO MAGNÉTICO TOTAL (MT)
E2	PROTEROZOICO SUPERIOR	GRANITÓIDES SIN A PÓS-TRANSCORRÊNCIA	Granitos, monzogranitos (E2); granodioritos; sienogranito	Porção E	1250-2750	125-160	50-82	100-190	0,40-0,45 -M2-	- M2 -	-----
E1				SW	1250-2400	85-160	50-76	100-220	0,30-0,45 -M1-	- M1 -	
E				SE	1250-2150	125-180	30-64	100-130	0,45-0,65 - M -	- M -	
D	PROTEROZOICO INTERIOR	GRANITÓIDES SINTRANS-CORRÊNCIA	Granito fino foliado, granodioritos	N-NW	550-700	75-100	24-30	30	0,60-0,80	- K -	Conjunto de anomalias dipolares de amplitude média/alta (50-240 mt), 3 Km de extensão linear. - II -
C		GRANITÓIDES SINTANGENCIAIS	Ortognaisses quartzo-monzoníticos; granodioríticos	Porção NE e SE (?)	900-1250	90-145	30-46	35-60	0,50-0,90	-M + Am + L	Relevo magnético ondulado formado por uma série de anomalias de amplitude média (50-100 mt), extensão linear de 2 a 3 Km. - I -
				SW							Anomalia isolada associada abaixo magnético, forma elipsoidal, amplitude alta (180 mt), extensão linear de 6 Km
B2	PROTEROZOICO	COMPLEXO IRAJAÍ	Paragnaisses feldspáticos a duas micas com intercalações de calcários; intercalações de metavulcânicas englobando anfíbolitos metatufos, metacherts, além de metagabros (B2)	Porção Central	500-600	50-65	16-20	30-35	0,50-0,90	- P -	Relevo magnético suave ondulado com amplitude muito baixa (20 mt) - F -
B1				NE	550-650	60-70	20-24	35-75		- L -	
B				Porção Central e W-SW	500-750	50-90	18-30	25-70		- K -	
A3	ARQUEANO	COMPLEXO GNAÍSSICO-MIGMATÍTICO	Ortognaisses granodioríticos, migmatizados, paragnaisses, anfíbolitos e leptinitos	N	600-1000	100-165	20-30	30-40	0,70-0,91	- Am + K -	Relevo magnético suave com amplitude baixa (40 mt) - G -
A2				NW	600-950	65-110	24-40	30-50		- K -	
A1				N	750-1150	50-165	18-34	30-55	- K -	- K -	Obs.: A zona G engloba litologias das Unidades e subunidades de A; B e D.
A				S-SE	900-1250	95-150	26-36	40-65			
APÊNDICE A					Dados obtidos em mapas de contorno de geofísica da Folha Monteiro, em escala 1:100.000 (Wanderley, 1990; Azevedo et al., 1990)			Ver Fig.5.6		Ver Fig.5.5	Ver Fig.5.2

A fase seguinte do estudo consistiu na combinação das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas para se proceder à análise simultânea de todos os dados. Os resultados alcançados são discutidos a seguir.

5.3 - INTEGRAÇÃO E ANÁLISE SIMULTÂNEA DAS IMAGENS TM/LANDSAT-5 E GAMAESPECTROMÉTRICAS

Ao término da aplicação da transformação por componentes principais das seis bandas TM/Landsat-5 (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 e TM7) e de posse das imagens componentes principais resultantes, observou-se que a simples transferência e integração destas imagens com as imagens geofísicas dos canais do urânio, do tório e do potássio (eU, eTh e %K) não podia ser realizada sem uma análise prévia dos resultados. Fundamentalmente, cada imagem componente principal (NC1, NC2 e NC3) reúne um volume de informações específicas, originárias de diferentes faixas do espectro eletromagnético e com diferentes distribuições pelas imagens componentes principais, de tal modo que é necessário mostrar o que acontece com estas imagens antes de reuni-las às imagens geofísicas. Desta forma, apresenta-se a seguir uma análise sucinta dos resultados estatísticos com as respectivas imagens componentes principais obtidas.

5.3.1 - ANÁLISE DAS IMAGENS COMPONENTES PRINCIPAIS TM/LANDSAT-5

Na Tabela 5.3 são mostrados os resultados estatísticos da transformação por componentes principais, que envolvem seis bandas TM/Landsat-5.

Nessa tabela, a matriz de correlação mostra que as bandas 1, 2 e 3 são as mais correlacionadas entre si. Em seguida vêm as bandas 5 e 7, enquanto a banda 4 é a menos correlacionada com todas elas. Tal distribuição de-

nota que os dados se agrupam segundo três conjuntos distintos, o que revela uma estrutura tridimensional dos dados dentro da área de estudos. Esta distribuição dos dados Landsat, segundo três direções principais de distribuição, tem sido encontrada nos estudos de alterações espectrais em culturas plantadas (Townshend et al., 1983; Townshend, 1984) e na avaliação e seleção de bandas para discriminação de rochas carbonáticas (Meneses, 1986).

Embora a alta correlação dos dados TM/Landsat-5 tenha servido como critério de seleção de bandas TM/Landsat para estudos de discriminação litológica de carbonatos (Meneses, 1986), neste estudo optou-se por aplicar a transformação sobre todos os dados e depois retirar as componentes com maior conteúdo de informação, a fim de reuni-las às imagens geofísicas. Este procedimento garantiu que toda informação disponível nas bandas TM fosse utilizada na transformação por componentes principais.

Ainda na Tabela 5.2 estão colocados, por ordem decrescente de conteúdo de informação, os autovalores e as porcentagens de variância e de variância acumulada. Estes dados mostram que quase toda informação foi agrupada nas três primeiras imagens componentes principais, após a aplicação da transformação. Estes resultados revelam um alto nível de compactação dos dados nas três primeiras imagens componentes principais. A primeira componente principal detém 88% da informação e junto com a segunda e a terceira componentes totalizam 97% de toda informação da cena.

Quanto às porcentagens de distribuição da informação para os novos eixos componentes principais, elas podem ser observadas na matriz de autovetores da Tabela 5.3 e na Figura 5.7.

TABELA 5.3 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA TRANSFORMAÇÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS DAS SEIS BANDAS DO TM.

<u>Matriz de coeficientes de correlação</u>						
	4	5	7	1	2	3
4	1,00	-	-	-	-	-
5	0,64	1,00	-	-	-	-
7	0,57	0,91	1,00	-	-	-
1	0,66	0,79	0,80	1,00	-	-
2	0,80	0,82	0,83	0,92	1,00	-
3	0,74	0,85	0,86	0,90	0,97	1,00

<u>Matriz de coeficientes autovetores</u>						
	4	5	7	1	2	3
NC1	0,228	0,784	0,385	0,200	0,175	0,338
NC2	0,752	0,408	0,160	0,206	0,261	0,364
NC3	-0,500	-0,411	0,475	0,347	0,198	0,442
NC4	-0,334	0,221	-0,768	0,377	0,115	0,305
NC5	-0,100	0,010	0,095	-0,785	0,026	0,603
NC6	-0,104	0,027	-0,031	-0,196	0,921	-0,318

	<u>Autovalores</u>	<u>% Variância</u>	<u>% Variância acumulada</u>
NC1	1248,59	88	88
NC2	89,60	6	94
NC3	43,01	3	97
NC4	20,41	1	98
NC5	9,08	0	0
NC6	1,17	0	0

Os coeficientes autovetores, em ordem consecutiva, descrevem a direção relativa do eixo da componente em relação à direção do eixo das bandas originais. Quanto maior o ângulo subentendido pelos dois eixos, maior o cosseno deste ângulo e, portanto, mais próximo estará o novo eixo componente da direção original (Gillespie, 1980).

A primeira componente principal (NC1), com 88% de informação, tem uma contribuição positiva de todas as bandas, mas, um pouco maior das bandas TM5, TM7 e TM3. Esta imagem tem sido descrita na literatura como uma imagem que descreve o brilho médio da cena (Gillespie, 1980; Menezes, 1986), correspondendo a uma soma das médias das imagens da cena utilizada. Pode-se observar na Figura 5.8 que a primeira imagem componente principal reúne as características de quase todas as coberturas superficiais (aspectos de relevo, estradas, rede de drenagem, açudes, áreas de plantio).

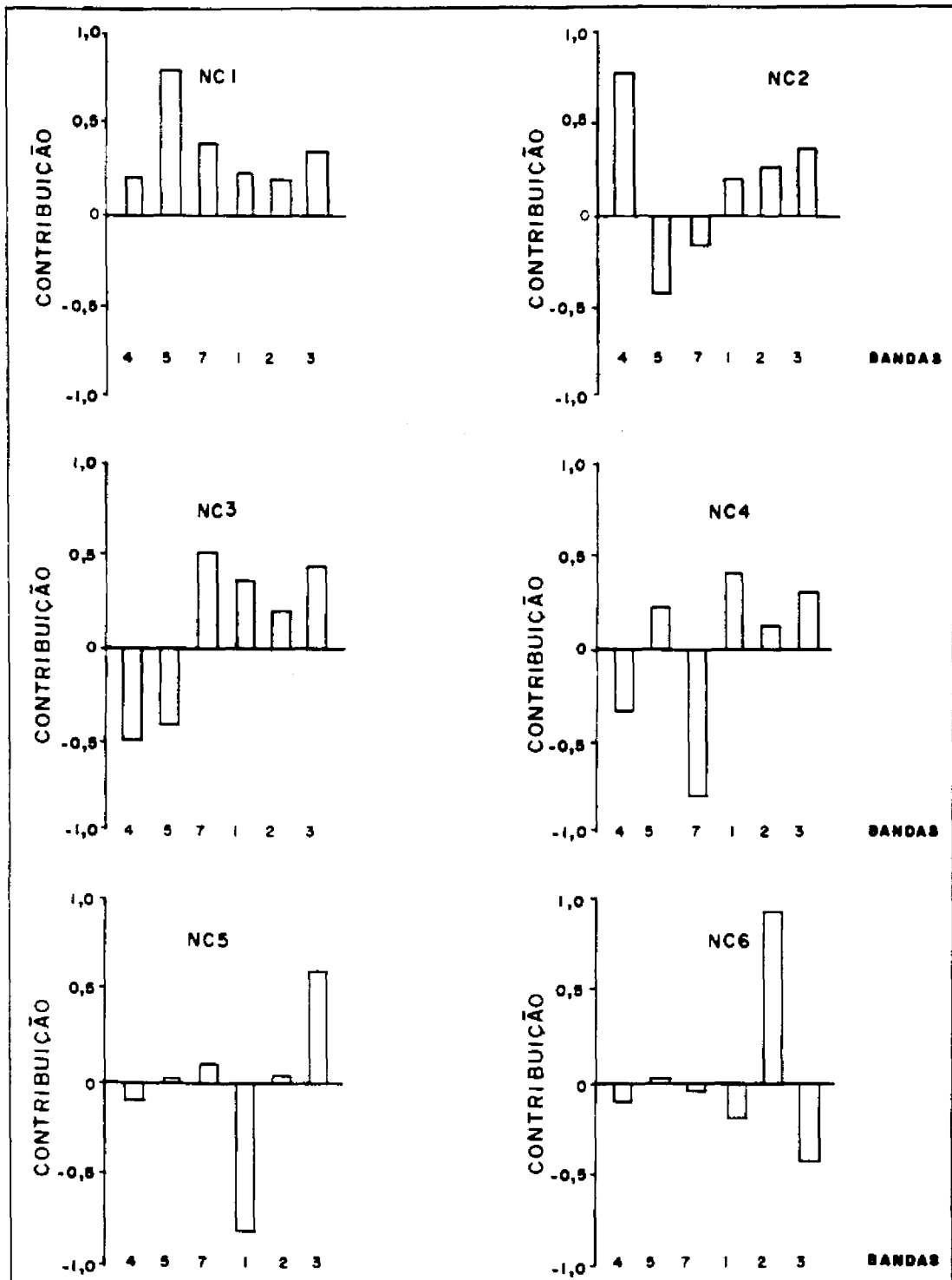


Fig. 5.7 - Porcentagens de contribuições de cada banda TM/Landsat-5 para cada novo eixo componente principal.

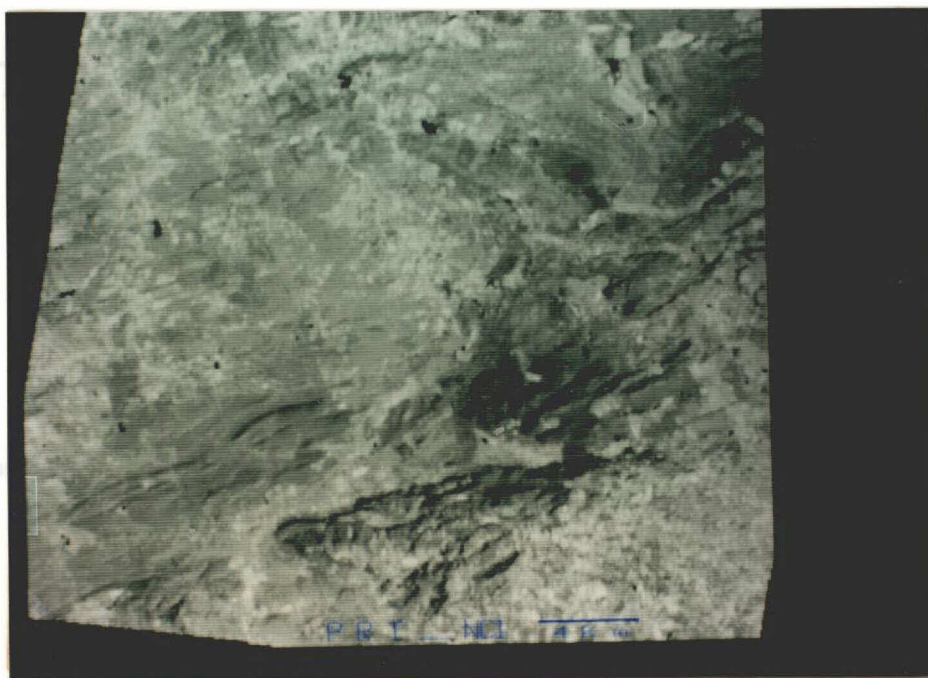


Fig. 5.8 - Primeira imagem componente principal (NC1), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.

A segunda componente principal (NC2), com 6% de informação, tem contribuição positiva e muito alta das bandas TM4 e TM3, para em seguida vir as bandas TM5 e TM7 com contribuições negativas. A imagem segunda componente principal (NC2) destaca as diferenças entre as áreas com cobertura vegetal, bem delimitadas segundo a sua maior ou menor densidade (Figura 5.9), das áreas desprovidas de vegetação (área de plantio, açudes).

As áreas de solos mais expostos (terrenos preparados para plantio) contrastam com as áreas de vegetação mais densa e de maior porte nas encostas de elevações maiores e com as matas de galeria ao longo dos riachos reforçando os contornos das drenagens maiores.

Nota-se, claramente, que esta imagem reflete diferenças espectrais entre bandas, conforme descrevem os resultados estatísticos, através da distribuição dos coeficientes autovetores (Tabela 5.3 e Figura 5.7).

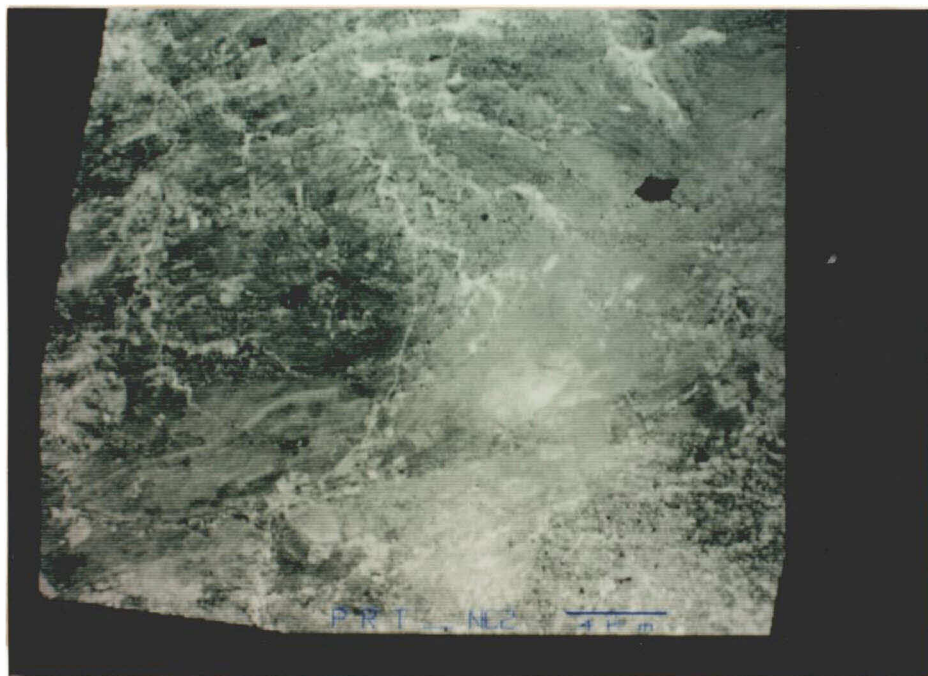


Fig. 5.9 - Segunda imagem componente principal (NC2), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.

A terceira componente principal (NC3), com 3% de informação, tem maior contribuição positiva da banda TM7, seguida das bandas TM3, TM1 e TM2. As contribuições negativas vêm por conta das bandas TM4 e TM5. Observa-se na Figura 5.10 que as áreas de vegetação verde aparecem escuras, enquanto as áreas de solo preparado aparecem brancas, numa situação contrária ao que ocorre com a segunda componente principal (NC2). Mesmo assim, esta imagem também reflete diferenças espectrais entre alvos da cena.

As imagens (NC1) e (NC3) são boas para estudos que envolvem a análise de feições de relevo e drenagem, enquanto a imagem NC2 serve para estudos que envolvem a discriminação, ou a análise de alterações espectrais dos alvos da cena.

Entendido o comportamento da distribuição da informação pelas imagens componentes principais dos dados TM/Landsat-5, e de posse destas imagens, tiveram início os trabalhos para combiná-las com as imagens geofísicas aplicando a transformação por componentes principais. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.

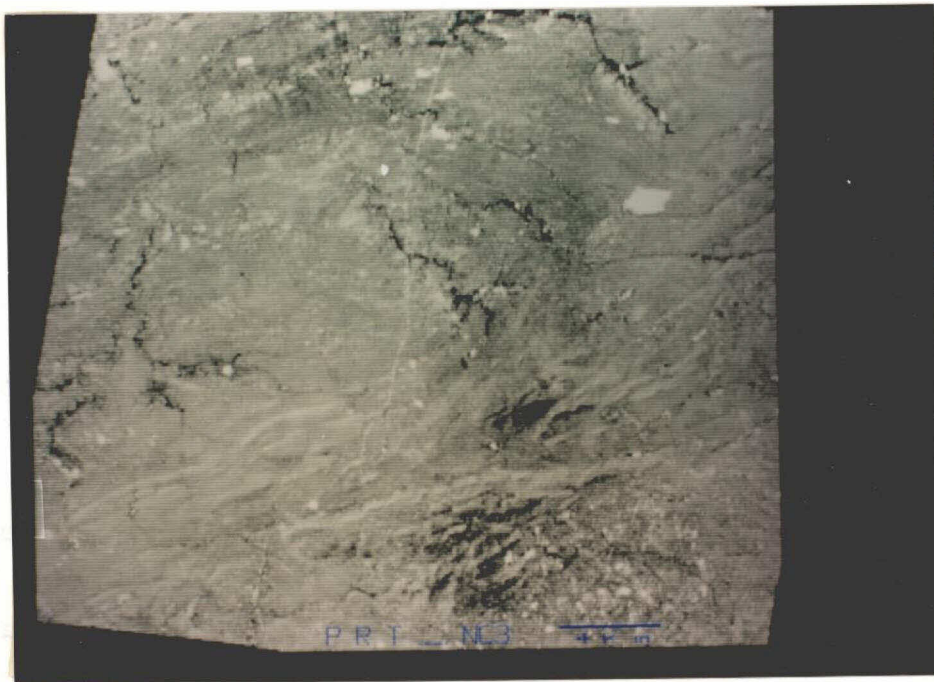


Fig. 5.10 - Terceira imagem componente principal (NC3), obtida das seis bandas TM/Landsat-5.

5.3.2 - ANÁLISE DAS IMAGENS COMPONENTES PRINCIPAIS TM/LANDSAT-5 E GAMAESPECTROMÉTRICAS

Os resultados estatísticos da análise por transformação de componentes principais das imagens aerogeofísicas e TM/Landsat-5 da região de estudo são mostrados na Tabela 5.4.

A matriz de correlação mostra que os canais do urânio e do tório são os mais correlacionados entre si. Por ordem decrescente de correlação vem o urânio com o potássio e o tório com o potássio. Há uma baixa correlação positiva entre NC2 e os canais individuais do eU, eTh e K e negativa entre as demais componentes principais NC1 e NC3 e os canais do urânio, do tório e do potássio. Os coeficientes de correlação da Tabela 5.4 demonstram um grau muito baixo de correlação dos dados. Esta baixa correlação dos dados multiespectrais com os dados gamaespectrométricos também foi encontrada por Crawford (1981). Os autovalores, as porcentagens de variância e de variância acumulada (Tabela 5.4) revelam uma estrutura em quatro direções principais de distribuição dos dados.

TABELA 5.4 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DA TRANSFORMAÇÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS DA IMAGENS TM/LANDSAT-5 E GAMAESPECTROMÉTRICAS.

<u>Matriz de coeficientes de correlação</u>						
	eTh	eU	K	NC1	NC2	NC3
eTh	1,00	-	-	-	-	-
eU	0,91	1,00	-	-	-	-
K	0,65	0,75	1,00	-	-	-
NC1	-0,34	-0,35	-0,26	1,0	-	-
NC2	0,24	0,24	0,21	-0,04	1,00	-
NC3	-0,11	-0,12	-0,16	0,05	-0,23	1,00

<u>Matriz de coeficientes autovetores</u>						
C1	0,538	0,558	0,496	-0,285	0,223	-0,147
C2	0,122	0,124	0,044	-0,296	-0,618	0,706
C3	0,141	0,145	0,157	0,777	0,274	0,506
C4	0,081	0,113	0,232	0,468	-0,701	-0,466
C5	-0,540	-0,232	0,798	-0,093	0,046	0,086
C6	-0,615	0,765	-0,191	0,012	0,003	-0,009

	<u>Autovalores</u>	<u>% Variância</u>	<u>% Variância Acumulada</u>
C1	2,85	47	47
C2	1,13	18	65
C3	0,83	13	78
C4	0,74	12	90
C5	0,37	06	96
C6	0,08	01	97

Observa-se que a primeira componente principal (C1) detém 47% da informação da cena. Segue-se até a quarta componente (C4) para chegar a 90% da informação e atingir os 97% de toda informação da cena na sexta imagem componente principal. Tal distribuição dos dados suscitou investigação da informação presente nestas componentes de mais alta ordem para definir a sua qualidade e a importância em termos de conteúdo de informação. O conteúdo e a distribuição da informação podem ser vistos na matriz de coeficientes autovetores (Tabela 5.4 e Figura 5.11).

A primeira componente principal (C1) com 47% da informação da cena corresponde a uma média ponderada dos dados de raiosgama com alguma contribuição positiva da segunda componente principal dos dados espectrais NC2. Tal reunião de dados empresta à imagem C1 um aspecto enevoadado, tendo como "background" a imagem TM/Landsat (Figura 5.12). As imagens componentes NC1 e NC3 dos dados espectrais têm contribuição negativa (Figura 5.11).

A segunda componente principal (C2) recebe uma maior contribuição de NC3 com muito pouca contribuição dos dados aerogeofísicos. As contribuições de NC1 e NC2 são negativas para esta imagem (Figuras 5.11 e 5.12). Observa-se que sobre a área útil da imagem fica difícil perceber a participação dos dados aerogeofísicos, que só são notados nas bordas dos produtos por falta de recobrimento da imagem TM registrada. A diferença entre essa imagem e a imagem NC3 anterior é que ela não destaca bem as feições de relevo devido ao aspecto enevoadado que reduz os contrastes mais finos da cena.

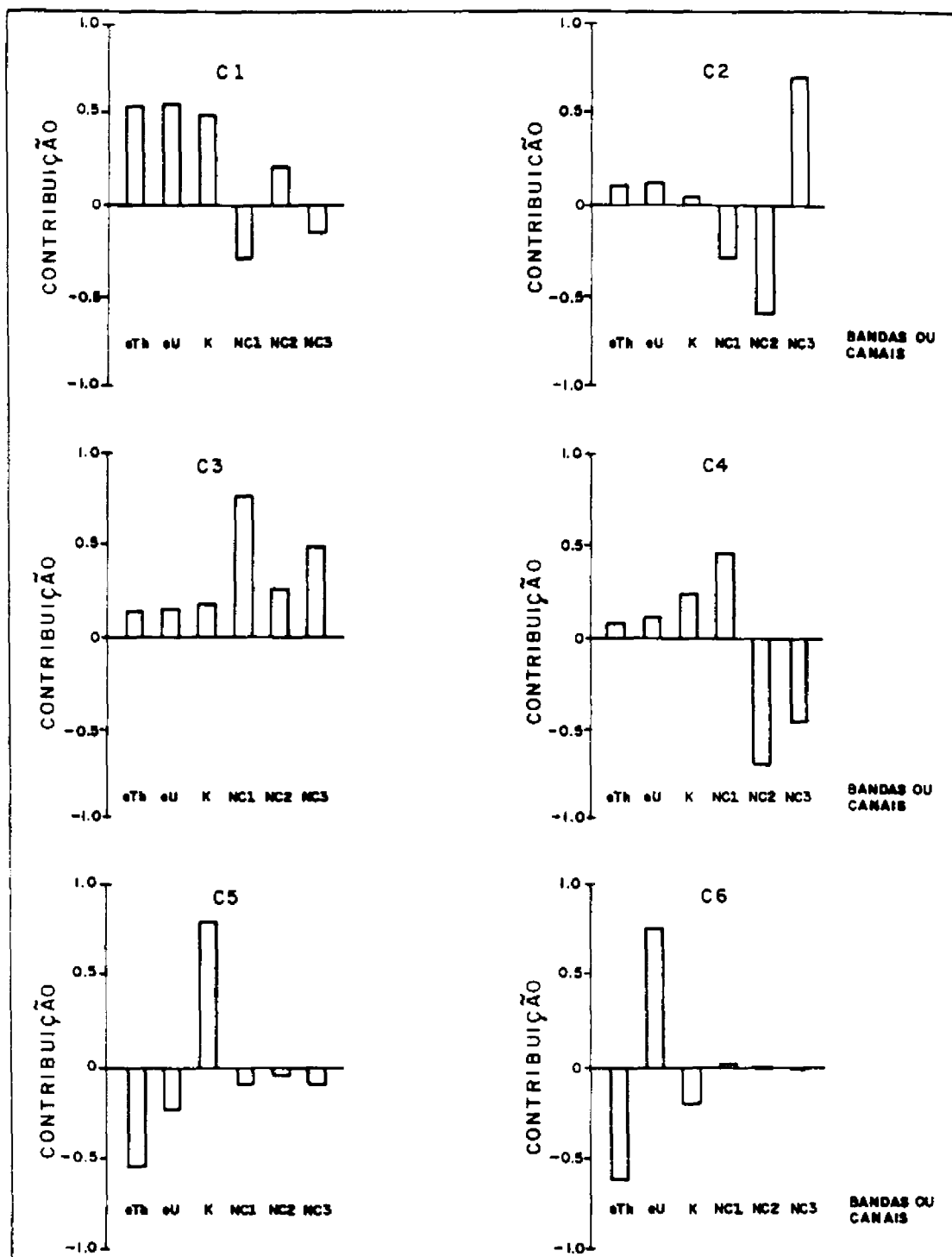


Fig. 5.11 - Porcentagens de contribuições de cada banda ou canal individual para cada novo eixo componente principal.

A terceira imagem componente principal (C3) recebe uma contribuição positiva de todas as bandas. Ela conta com maior contribuição da componente NC1, um pouco de NC3 e de NC2, bem menos. Isto pode ser visto na Figura 5.12 onde as bordas da imagem são limpas. A imagem se parece com uma imagem albedo das componentes TM/Landsat-5, mas sem mostrar contrastes mais finos e feições de textura do relevo como é usual nestas imagens. Esta redução de contraste é dada pelos dados aerogeofísicos. As feições de relevo sobre o granitóide da região de Duas Barras ficam totalmente obscurecidas. O mesmo ocorre com os corpos dos granitóides sintangenciais da porção extremo nordeste da área (Unidade C - Apêndice A).

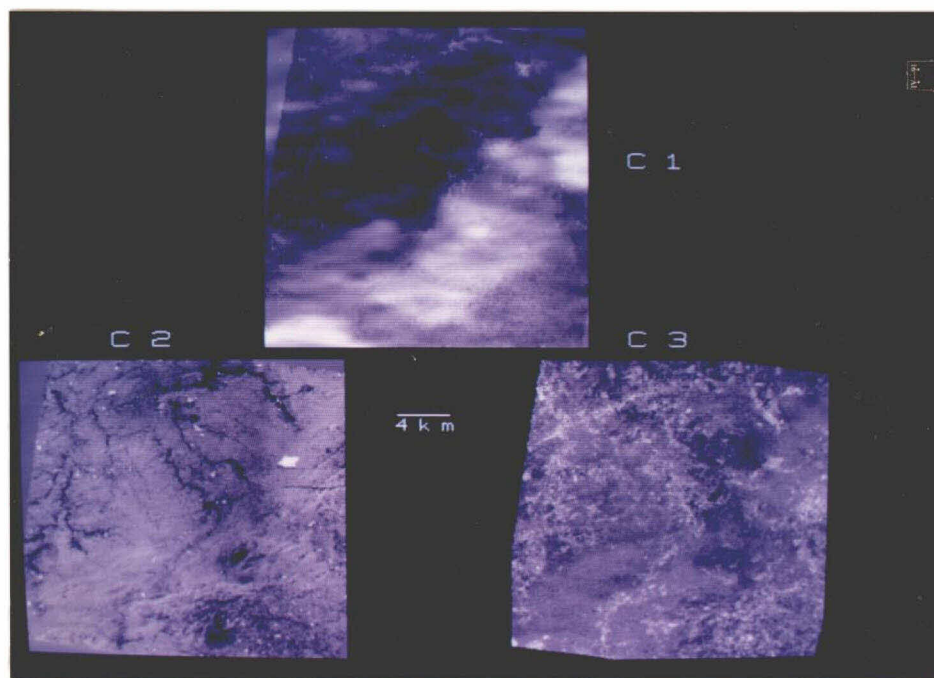


Fig 5.12 - Imagens componentes principais (C1, C2 e C3), obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.

Com relação às componentes de mais alta ordem, o fato mais importante é que, apesar de os números indicarem um baixo nível de informação nestas imagens, elas podem conter alguma informação importante como foi o caso do presente estudo (Figura 5.13).

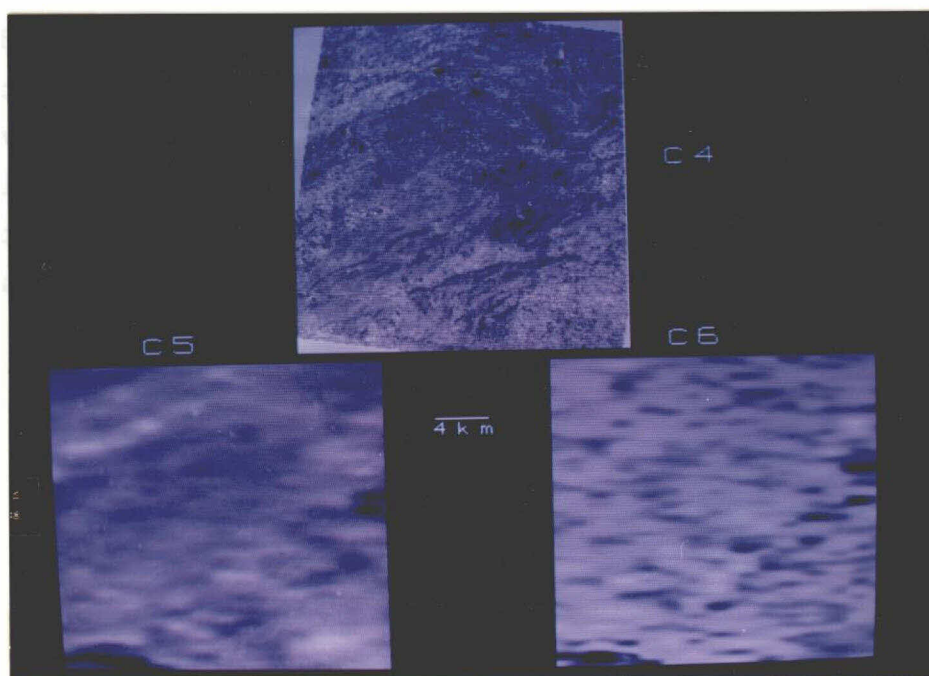


Fig. 5.13 - Imagens componentes principais (C4, C5 e C6) de mais alta ordem, obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.

Esta colocação torna-se clara na quarta componente principal, com 12% de informação da cena, na qual as feições texturais de relevo e drenagem e a estrutura geológica estão bastante realçadas. A componente C4 tem contribuição positiva de NC1 e dos canais dos radioelementos e contribuição negativa das demais banda ou canais (NC2 e NC3). Pode-se ver na porção norte-noroeste da área que o contato geológico entre as rochas da Unidade A₁ (Complexo Gnáissico-Migmatítico) e da Unidade B (Complexo Irajaí) é bem nítido. Esta imagem, junto com a composição

colorida dos radioelementos, ajudou a redefinir no campo esse contato geológico, anteriormente posicionado mais para o norte. Esta é uma imagem ideal para estudos que se utilizam das feições do relevo natural.

A quinta imagem componente principal C5, com 6% de informação é quase totalmente formada pelos dados do canal do potássio. Todas as demais bandas ou canais participam com contribuições negativas. A imagem é de muito baixo contraste e a informação disponível restringe-se a detalhes localizados.

A sexta imagem componente principal C6, com 1% de informação, mostra praticamente o restante dos dados do canal do urânio. É uma imagem de baixo contraste que realça, da mesma forma que a imagem componente C5, detalhes ou zonas localizadas.

A composição colorida da Figura 5.14 reúne as três primeiras imagens componentes principais, tendo sido atribuídas as cores vermelha para C3, verde para C2 e azul para C1, respectivamente.

Ao observar esta composição, a primeira impressão que se tem é a de uma forte presença de "nuvens", notadamente, nas áreas de ocorrência das rochas granitóides na porção sudeste da área. Junto com estas, o granitóide da região de Duas Barras fica melhor delineado do que só com os dados aerogeofísicos. Os corpos pós-transcorrentes estão da mesma forma realçados, mas com um incremento de informação representado pela tonalidade mais clara, que reflete a forte presença e o caráter mais radioativo daquelas rochas. Na porção noroeste ocorrem, em inúmeros locais, "nuvens" que indicam um incremento no conteúdo de radioatividade. Elas estão bordejando a zona de contato entre as rochas do embasamento e o Complexo Irajá, reforçando a po-

sição deste contato. Dentro deste último complexo, destaca-se a quase total ausência de radioatividade.

Quanto à informação espectral, ela se distribui segundo as diferentes classes e padrões das coberturas superficiais, sendo fortemente controlada pela vegetação que, por sua vez, também é controlada, em parte, pelo substrato rochoso. As áreas em amarelo tem maior interesse para a Geologia em termos de discriminação de litologias. Por se tratar de locais de solos mais expostos e com algum conteúdo de informação sobre estes materiais, estas áreas precisariam ser investigadas através de outras técnicas de realce de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto como, por exemplo, a técnica de razão de bandas.

Ainda na composição colorida da Figura 5.14 tem destaque, no extremo nordeste, o traço de falha, definido pelos dados combinados, ao contrário do que acontece só com os dados aerogeofísicos, onde seus contornos são bastante irregulares e, com isto, a feição estrutural não fica bem discernível. O embasamento no canto sudeste também fica bem definido por valores radiométricos mais baixos e pela textura dos dados Landsat.

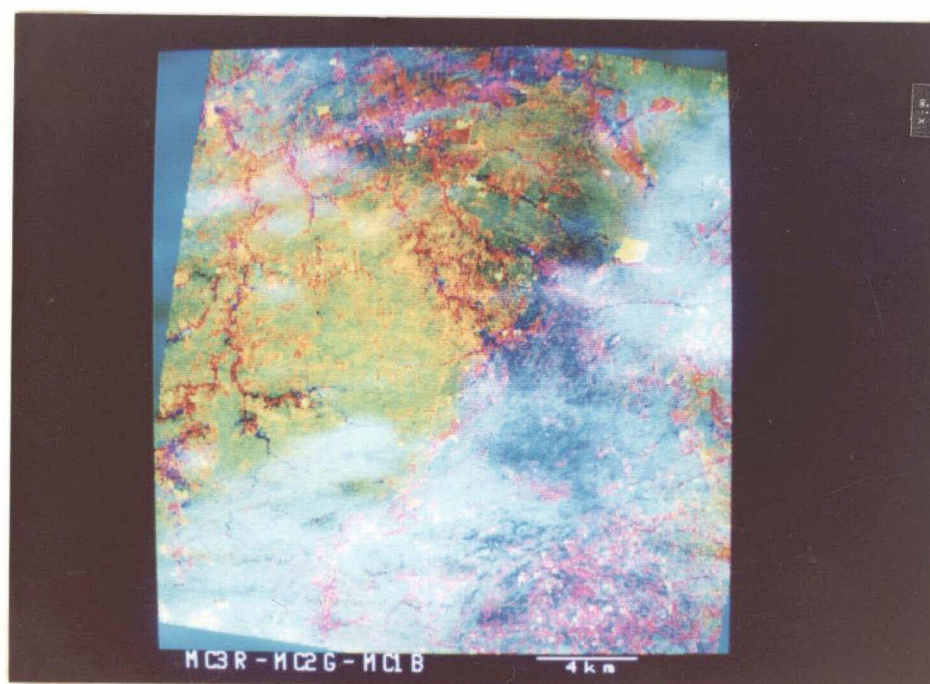


Fig 5.14 - Composição colorida das imagens componentes principais MC3 R - MC2 G - MC1 B, obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.

De um modo geral, o que se observa é uma boa correlação espacial dos dados, o que permite que as informações possam ser complementadas e enfatizem, em diferentes locais, diversos aspectos geológicos.

A composição colorida da Figura 5.15 procura ilustrar uma combinação das componentes de mais alta ordem. A predominância de dados geofísicos empresta um enevoamento à imagem reduzindo o contraste da cena. Mesmo assim, pode-se destacar feições localizadas para a análise posterior no campo.

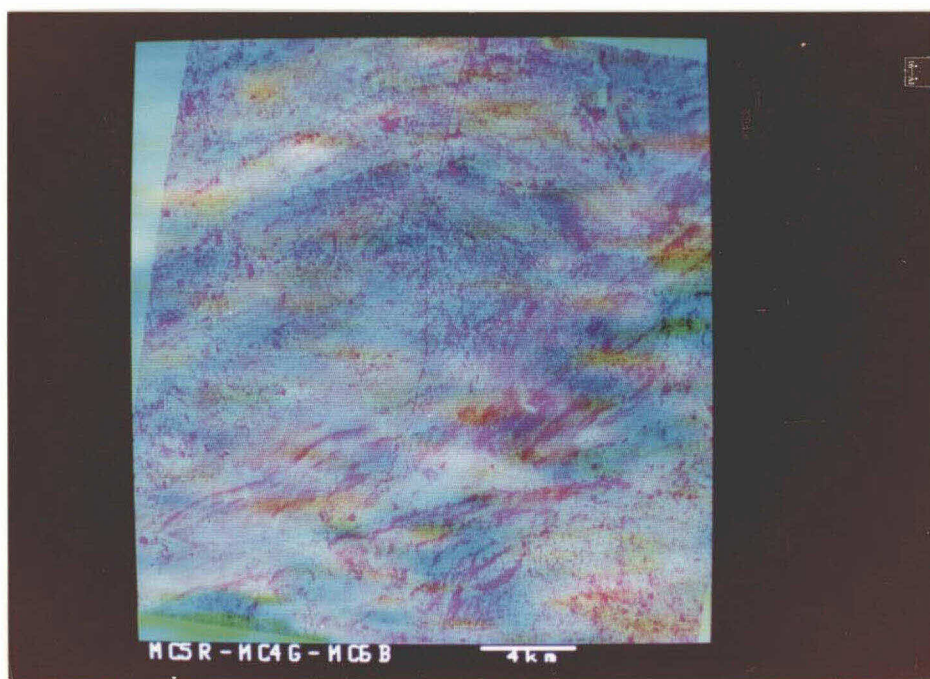


Fig. 5.15 - Composição colorida das imagens componentes principais MC5 R - MC4 G - MC6 B de mais alta ordem, obtidas das imagens TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas.

As feições de relevo mantêm-se destacadas e em vários locais superpõem-se mais uma vez pequenas variações dos dados geofísicos. Tem destaque nesta imagem os corpos granitóides tardi a pós-transcorrência, cujos contatos e zonação radioativa ficam muito claras pelas variações de cores.

Finalmente, tem-se a acrescentar que todos os produtos utilizados podem ser sobrepostos diretamente sobre uma carta topográfica e também podem ser reproduzidas ampliações, em papel fotográfico, para ser usadas no campo. Pode-se também subdividir a área em quadrantes e fazer montagens a partir de ampliações na tela do monitor do sistema que se esteja utilizando.

Ao término desta discussão, são apresentados os principais resultados alcançados e, em seguida, as conclusões finais do trabalho.

5.4 - SÍNTESE DOS RESULTADOS

a) Quanto à fotointerpretação

1) Padrões fotogeológicos distintos permitiram separar 5 grandes unidades litológicas/litoestratigráficas denominadas Unidades A, B, C, D e E (Apêndice A), além de algumas subunidades mais representativas dentro da área de estudos. Em geral, as unidades fotogeológicas individualizadas correspondem aos Complexos Gnaíssico-Migmatítico; Complexo Irajá e às Rochas Plutônicas, anteriormente mapeados na região. Embora sejam definidas (Wanderley, 1990), três fases de deformação para a área de estudos, desde o Arqueano até o Proterozóico Superior, somente a última fase ficou caracterizada pelos dados levantados nas imagens fotográficas.

2) O Complexo Sertânia e os termos vulcanogênicos do Complexo Irajá não foram individualizados à luz dos dados disponíveis. A Unidade A foi subdividida em 3 subunidades possíveis de maior detalhamento no campo. Os resultados indicam um comportamento fotogeológico distinto entre a Unidade A da porção sul e suas correlatas (subunidades A₁, A₂ e A₃) da porção norte (Apêndice A).

3) Foi identificado mais um corpo intrusivo básico dentro do Complexo Irajá (ponto S₂₇ - Apêndice A), que pode ser detalhado tendo em vista a ocorrência de metavulcânicas e carbonatos ainda não-estudados e um corpo granítico nas proximidades do riacho dos Cavalos (Apêndice A).

4) Um resultado considerado relevante é fornecido pelo método de fotointerpretação utilizado. Este permite que se tenha armazenado permanentemente o mapa com o registro dos elementos texturais de relevo e drenagem, que pode ser retomado todas às vezes que se fizer necessário para estudos variados de uma mesma área. Mantém-se, desta forma, uma base de dados fundamental para trabalhos de revisão, detalhamento e reinterpretação de áreas anteriormente mapeadas.

b) Quanto aos dados aerogeofísicos

5) Mesmo com uma interpretação de caráter qualitativo, que não envolve, portanto, o estudo de modelos matemáticos que requerem cálculos, foi possível mapear com razoável precisão algumas anomalias e cinco grandes zonas magnéticas relacionadas, ou não, a blocos litoestrutural distintos, quais sejam as zonas F, G, H, I e J, além de feições menores (F_1 , I_1) a elas associadas (Figura 5.5). Em linhas gerais, tais zonas correlacionam-se com as unidades litoestratigráficas cartografadas na área de estudos, anteriormente.

6) Várias pequenas anomalias magnéticas e uma anomalia mais significativa foram discriminadas na imagem de nível de cinza, obtida a partir dos dados de campo magnético total. As anomalias correspondem às zonas I_1 e F_1 (Figura 5.2). Nesta imagem também foram traçadas algumas feições retilíneas, consideradas como alinhamentos magnéticos da área de estudos.

7) A composição colorida K G - eU R - eTh B (Figura 5.5) mostra a distribuição dos radioelementos eU, K e eTh e suas proporções relativas de concentração, evidenciadas pelas variações de matizes e saturação de cores. Com tal composição, foi possível separar três grandes zonas ga-

maespectrométricas principais, denominadas K, L e M, as quais correspondem, em geral, aos Complexos Gnáissico-Migmatítico, Irajá e às rochas granitóides, respectivamente Unidades A, B e E (Apêndice A) e duas zonas de valores muito altos M_1 e M_2 , tidas como as anomalias radioativas da área de estudo. Estas anomalias sobrepõem-se aos granitóides da localidade de Serra Branca e do Serrote Caracol (subunidades E_1 e E_2 - Apêndice A).

8) A composição colorida dos radioelementos mostra variações de enriquecimento em radioelementos nas rochas granitóides da área de estudo. Atribui-se tais mudanças ou variações ocorridas durante o processo de formação dessas rochas, que podem ter reflexos nas suas composições mineralógicas.

9) A imagem da razão eU/eTh , associada à imagem de campo magnético total, foi utilizada para inferir variações mineralógicas nas rochas granitóides, permitindo classificar, ao nível de sensoriamento remoto, como granitóide do Tipo I (magnético), Série a magnetita (subalcalino), (Chappell e White, 1974; Maurice e Charbonneau, 1987) e o granitóide da região de Duas Barras (Apêndice A).

10) A conclusão dos resultados indicou a região do granitóide da região de Duas Barras como potencialmente favorável a abrigar mineralização de ouro, molibdênio e cobre.

c) Quanto aos dados combinados

11) Os dados TM/Landsat-5 têm uma estrutura tridimensional dada a alta correlação existente, notadamente, nas bandas do visível. Quando reunidos com os dados geofísicos, as componentes passam a ter uma estrutura quadridimensional em função da baixa correlação existente.

12) A cartografia geológica foi refinada e enriquecida em informações quando se usou a superposição espacial dos dados utilizados. Além disso, áreas de alterações (espectrais ou gamaespectrométricas) foram definidas de modo que estudos direcionados poderão ser efetuados em locais específicos visando avaliar vários assuntos (litoquímica, estrutural, petrologia...).

13) Foram encontradas informações sobre o relevo da área nos componentes de mais alta ordem, de modo que nem sempre ao utilizar as três primeiras componentes assegurasse a retenção de toda a informação disponível nos dados.

14) Mesmo com uma baixa correlação entre os dados da área de estudo, a técnica de transformação por componentes principais permitiu reduzir a dimensionalidade dos dados, de nove planos de informações para quatro planos finais (componentes principais C1, C2, C3, C4), agora resultantes da combinação dos dados TM/Landsat-5 e gamaespectrométricas. Com isto, obteve-se um outro resultado importante que foi o da combinação/superposição a qual reordenou os dados em função do seu conteúdo de informação.

15) Com as componentes TM/Landsat-5 foram separados grandes compartimentos espectralmente diferenciados pelas coberturas superficiais. Quando reunidas com as imagens geofísicas, além de maior detalhamento, obtiveram-se informações adicionais sobre a geologia da área de estudo. Diferentes composições realçaram diferentes atributos da superfície como solos, vegetação, drenagem etc.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Após examinar os resultados obtidos através da metodologia e das interpretações realizadas e discutidas nos capítulos precedentes, algumas conclusões são destacadas e colocadas a seguir:

a) Os resultados obtidos, ainda que em área restrita, demonstram a potencialidade da análise e integração de dados no formato de imagens de níveis de cinza na cartografia geológica básica. Os resultados encorajam a continuidade e o aprimoramento desta metodologia em outras regiões do País. Sua utilização sistemática e ampla tende a avançar e aprimorar também os trabalhos de mapeamento, prospecção e reinterpretação de áreas anteriormente mapeadas.

b) Conclui-se que as técnicas empregadas foram compatíveis e suficientes para a extração da informação e para mapear e indicar áreas e sítios promissores para uma investigação mais aprofundada e dirigida no campo. Permitiram também levantar novas questões e acrescentar outras informações ao conhecimento da área. Muito pode ser aprofundado em torno do processamento digital de imagens que é um campo vasto e aberto à pesquisa e aplicação de novas técnicas e métodos de análise e extração da informação. As possibilidades de manuseio de dados dentro de um SIG são inúmeras e muitas outras técnicas de análises estatísticas multivariadas podem ser implementadas a critério do usuário. A experiência mostrou que o geoprocessamento é dinâmico e a integração de dados é muito interessante; além disto, é preciso fazê-la para descobrir o potencial existente.

c) A fotointerpretação é uma etapa relevante por ocasião da integração de dados. De preferência devem ser utilizadas as imagens de sensoriamento remoto, cujas limitações naturais podem ser superadas com outros produtos como imagens de radar e fotos aéreas que completem a fotointerpretação. As imagens multiespectrais de sensoriamento permitem uma rápida familiarização com a área de trabalho. O método de análise das propriedades texturais de relevo e drenagem foi satisfatório para a execução da fotointerpretação.

d) Ficou evidente que a metodologia de geoprocessamento e integração de dados espacialmente referenciados na forma de imagens de níveis de cinza é válida, pois permite explorar visualmente os dados, acompanhando suas variações e formas, e favorece o estabelecimento, com maior precisão, da correlação dos diferentes dados empregados.

e) A utilização de dados aerogeofísicos como imagens representa um ganho real na qualidade e quantidade de informação que pode ser obtida. A imagem facilita a visualização em relação à distribuição e ao comportamento das litologias e estruturas, especialmente as de subsuperfície, relacionadas com os dados de magnetometria. Os dados foram combinados de uma maneira tal que se manteve a capacidade e o poder de representação em uma cartografia mais refinada e eficiente, o que auxiliou na definição de unidades geológicas. O processamento e a interpretação dos dados aerogeofísicos permitiram melhor caracterizar uma anomalia magnética e várias anomalias gamaespectrométricas localizadas, as quais são significativas para o modelamento e para a orientação de futuros trabalhos nas áreas, por exemplo, de Geoquímica, Petrologia e Litoquímica.

f) Quando reunidas com as imagens TM/Landsat-5, as imagens geofísicas ganham referencial geográfico, o que possibilita uma melhor correlação espacial e, conseqüentemente, descreve melhor as variações sofridas pelos dados. Esta alta correlação espacial possibilita concluir que as imagens multiespectrais de sensoriamento remoto podem ser utilizadas, após os trabalhos de fotointerpretação, para definir e posicionar, por exemplo, as malhas de vôos de aerolevantamentos geofísicos, de modo que se aproveite o máximo a informação geológica que possa ser obtida destes produtos.

g) A técnica de análise por transformação de componentes principais foi muito útil para superpor, combinar as diferentes imagens e reordenar as informações disponíveis. As composições coloridas também foram muito úteis para reuni-las. Deve-se contudo, no futuro, direcionar mais as composições para incluir combinações de componentes de mais alta ordem. Pelo menos no tocante à Geologia, ficou demonstrado que nas componentes de mais alta ordem pode-se encontrar informação geológica de interesse, mesmo que esta informação tenha valores numericamente baixos. Não se deve reunir todos os diferentes grupos de dados de uma única vez para não se perder o controle e o conhecimento das modificações sofridas por estes após a aplicação da transformação por componentes principais.

h) Mesmo com limitações intrínsecas aos dados utilizados quanto a resolução espacial, precisão de medidas, azimute, ângulo de elevação solar, falta de análises específicas para a natureza dos estudos, os resultados finais obtidos mostraram-se bons, pois permitiram, com razoável precisão, delinear e definir as principais características e feições geológicas da área de estudo. Pôde-se também levantar novas questões e suscitar pontos e dúvidas possíveis para um detalhamento da cartografia geológica básica reali-

zada anteriormente.

i) Em síntese, os dados, as técnicas e a metodologia empregada foram satisfatórias e consistiram em uma ferramenta útil, demonstrando potencial de aplicação para auxiliar os trabalhos de mapeamento geológico, visando esgotar a informação geológica antes das fases operacionais de campo: do mapeamento, da prospecção, ou mesmo da reinterpretação de áreas anteriormente mapeadas.

j) Conclui-se que a rapidez no processamento e a disponibilidade de equipamentos e técnicas, mormente de processamento digital de imagens, devem ser consideradas para superar as dificuldades usualmente encontradas na metodologia convencional. Desta forma, será possível avançar rapidamente no diagnóstico de áreas anômalas e sítios promissores para atividades mais sofisticadas de avaliação econômica de depósitos minerais. Com o avanço tecnológico da informática, "hardwares" e "softwares" mais dedicados estarão disponíveis, possibilitando atuar em áreas maiores e com maior volume de dados.

k) Fica também muito claro que o emprego do sensoria-mento remoto passa invariavelmente pelo campo e deve ser, por este, sistematicamente apoiado.

l) Para sumariar e concluir este estudo, a palavra chave vem a ser: **VISUALIZAÇÃO**. Este é o atributo mais relevante da integração e do manuseio de dados no formato de imagem digital, do qual a Geologia pode se utilizar para a execução de diversos estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarnissalo, J.; Franssila, E.; Eeronheimo, J.; Lakanen, E.; Pehkonen, E. On the integrated use of Landsat, geophysical and other data in exploration in the Baltic Shield, Finland. Photogrammetric Journal of Finland, 9(1):48-64, 1982.
- Afifi, A.A.; Clark, V. Computer-aided multivariate analysis. Belmont, CA, Wadsworth, 1984.
- Albuquerque, J.P.T. Inventário hidrogeológico básico do Nordeste, Folha Jaguaribe-SE. Recife, SUDENE. 1970. (Série Hidrogeologia, 32).
- Almeida, F.F.M. de Granitic rocks of the North East South America. Symposium on the Granitis and Basement of North-Eastern, Brazil and their Comparison with those of West Africa, Recife, 1-14 Oct. 1967. 51p.
- Almeida, F.F.M. de.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. de.; Fuck, R.A. Províncias estruturais brasileiras. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8., Campina Grande, SBG, 1977. Atas. Campina Grande, SBG-NE, 1977, p.363-391. (Boletim 6).
- American Society of Photogrammetry (ASP). Manual of remote sensing. Falls Church, VA, 1983. v.1.
- Aranoff, S.; Goodfellow, W.; Bonham-Carter, G.F.; Ellwood, D.J. Integration of surficial geochemistry and Landsat imagery to discover skarn tungsten deposits using image analysis techniques. In: European Space Agency (ESA). Remote Sensing Today's Solutions for Tomorrow's Information Needs; Proceedings of Symposium held in Zurich, 8-11 Sept. 1986. Paris, 1986, v.1, p.513-520 (ESA-SP-254).

Arkimaa, H. Some examples of multi-channel analysis of Landsat and geophysical data. Photogrammetric Journal of Finland, 9(1):38-47, 1982.

Azevedo, M.L.V. de; Motta, A.C.; Oliveira, R.G. de. Geofísica . In: Wanderley, A.A. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética provisional - Escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-D-IV Monteiro) Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM, 1990, 100p. il. Cap.5 p.57-78.

Barbosa, O. Mapa geológico da região do médio São Francisco Nordeste. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 1965. Escala 1:500.000.

_____. Geologia econômica de parte do médio São Francisco, Região Nordeste do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM, 1970. (Boletim 140).

Bolivar, S.L.; Freeman, S.B.; Weaver, T.A. Evaluation of integrated data sets - four examples. Computers and Geosciences, 9(1):7-75, 1983.

Brito Neves, B.B. de Elementos da Geologia pre-cambriana do Nordeste Oriental. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27., Aracaju, 1973. Anais. Aracaju, SBG, 1973. v.2, p.105-134.

_____. Regionalização geotectônica do Precambriano nordestino. (Tese de Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - USP. Instituto de Geociências, São Paulo, 1975. p.99-109

_____. O mapa geológico do Nordeste Oriental do Brasil escala 1/1.000.000. (Tese de Livre Docência) - USP. Instituto de Geociências, São Paulo, 1983. p.105-117.

Byrne, G.F., Crapper, P.F.; Mayo, K.K. Monitoring land-cover change by principal component analysis of multitemporal Landsat data. Remote Sensing of Environment, (10):175-184, 1980.

Burroughs, P.A. Principles of geographycal information systems for land resources assessment. Oxford, Claredon, 1986.

Carrere, V.; Nguyen, P.T. Multiple source data processing for regional geologic analysis. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, Thematic Conference, Remote Sensing for Exploration Geology, 4., San Francisco, CA, Apr. 1-4, 1985. Proceedings. Ann Arbor, MI, ERIM, 1985, p.735-744.

Chappell, B.W.; White, A.J.R. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8:173-174, 1974

Chavez Junior, P.S. Atmospheric, solar and M.T.F. corrections of ERTS digital imagery. In: American Society of Photogrammetry Convention, Phoenix, AZ, Oct. 1975. Proceedings. s.n.t. p.1-14.

Chavez Junior, P.S.; Kwarteng, A.Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal components analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55(3):339-348, Mar. 1989.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)
Relatório anual circunstanciado. Rio de Janeiro, SEGER, 1984. 223p.

- Coope, J.A.; Davidson, M.J. Some aspects of integrated exploration. In: Hood, P.J., ed. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores Ottawa, Geological Survey of Canada, (Economic Report 31) 1979. p.575-592.
- Crawford, M.F. The simultaneous use of Landsat and geophysical data in exploration for non-renewable resources. (Doctoral Dissertation) - Stanford University, Stanford, 1981.
- Crepani, E. Análise de fraturas através de imagens fotográficas de baixa resolução espacial: uma contribuição ao estudo da evolução tectônica da região da Chapada do Araripe - NE do Brasil. (Tese de Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - USP. Instituto de Geociências, São Paulo, 1987. 131p.
- Critchley, M.F.; Phillips, W.E.A.; Collier, D.W. Methods for correlating geological, geochemical and geophysical data with satellite imagery in Central Ireland. In: EARSEL/ESA Symposium on Interactive Approaches in Remote Sensing, Guilford, Surrey, UK, Apr. 8-11, 1984. Proceedings. Paris, ESA, 1984, p.51-56. (ESA-SP-214)
- Dantas, J.R.A. Mapa geológico do Estado de Pernambuco texto explicativo. Recife, DNPM, 1980. 112p. (Série Mapas e Cartas de Síntese, 1).
- Davis, J.C. Statistics and data analysis in geology. New York, NY, John Wiley, 1973. 550p.
- Dobrin, M.B. Introduction to geophysical prospecting. New York, NY, McGraw-Hill, 1960. 443p.

- Doyle, F.J. Digital terrain models: an overview. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(12):1481-1485, Dec. 1978.
- Duval, J.S. Radioactivity method. Geophysics, 45(11):1690-1694, 1980.
- Ebert, H. Tectônica e metamorfismo regional do escudo brasileiro. Recife, SUDENE, Divisão de Geologia, 1964. 39p.
- Eliason, P.T.; Donovan, T.J.; Chavez Jr., P.S. Integration of geologic, geochemical and geophysical data of the Cement oil field, Oklahoma, using spatial array processing. Geophysics, 48(10):1305-1317, 1983.
- Erthal, G.J.; Oliveira, M.O.B.; Felgueiras, C.A.; Neto, G.C.; Paiva, J.A. O banco de dados geográficos do INPE. In: Simposio Brasileiro de Banco de Dados, 1., Rio de Janeiro, 11-12, 1986. Anais. Rio de Janeiro, SBC/PUC, 1986, p.41-47.
- Engel, J.L.; Weinstein, O. Thematic mapper: an overview. IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing, GE21(3):258-265, July 1983.
- Felgueiras, C.A. Desenvolvimento de um sistema de modelagem digital de terreno para microcomputadores. (Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1987. 243p. (INPE-4406-TDL/303).

- Ferreira, C.A. Metalogenia. In: Wanderley, A.A. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional - Escala 1:100.000 (Folha SB. 24-Z-D-IV Monteiro) Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM, 1990. 100p. il. Cap.6 p.79-83.
- Ferreira, J.A. de M.; Albuquerque, J.A. de M. Sinopse da geologia da Folha Seridó. Recife, SUDENE, 1969. 52p. il. (Brasil. SUDENE Série Geologia Regional, 18).
- Figueiras, A.J.M. Aspectos geológicos e hidrogeológicos da região de Albuquerque Né-Sertânia(PE). Recife, UFPE. Escola de Geologia, 1972. 70p. (Relatório de Graduação).
- Fung, T.; Le Drew, E. Application of principal components analysis to change detection. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 53(12):1649-1658, Dec.1987.
- Galbraith, J.H.; Saunders, D.F. Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. Journal of Geochemical Exploration, 18:49-73, 1983.
- Galvão, W.S. Avaliação de técnicas de seleção de bandas multiespectrais visando à discriminação de rochas carbonáticas. (Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1989. 286p. (INPE-4850-TDL/365).
- Gillespie, A.R. Digital techniques of image enhancement. In: Siegal, B.S.; Gillespie, A.R., ed. Remote Sensing in Geology, New York, NY, Wiley, 1980. cap. 6, p. 137-226.

Guinness, E.A.; Arvidson, R. E.; Leff, C.E.; Edwards, M.H.; Bindshadler, D.L. Digital image processing applied to analysis of geochemical data for Southern Missouri. Economic Geology, 78(4):654-663, 1983.

Guy, M. Quelques principes et quelques experiences sur la methodologie de la photo-interpretation. In: Symposium Internationale de Photointerpretation 2., Paris, 1966. Acte. s.n.t. v.1, p. 21-41.

Hovis Jr., W.A.; Callahan, N.R. Infrared reflectance spectra of igneous rocks and red sandstone from 0,5 to 2,2 micron. Journal of the Optical Society of America. 56(5):639-643, 1966.

Hood, P.J.; Holroyd, M.T.; McGrath, P.H. Magnetic methods applied to base metal exploration. In: Hood, P.J., ed. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores Ottawa, Geological Survey of Canada, (Economic Geology Report 31) 1979, p. 77-104.

Hunt, G.R. Eletromagnetic radiation: the communication link in remote sensing. In: Siegal, B.S.; Gillespie, A.R., ed. Remote sensing in geology. New York, N.Y., John Wiley, 1980. cap.2, p.5-45.

_____ Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics, 42(3):501-513, 1977.

Ii, F.A.M.; D'Alge, J.C.L.; II, S.S.; Castellari, S.P.; Correia, V.R.M. Geocodificação de imagens orbitais para utilização em Sistemas de Informações Geográficas. In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 14., Gramado, Rs, 21-26 maio 1989. Anais. v.2, p.285-288.

- Instituto de Pesquisas Espaciais. Departamento de Processamento de Imagens (INPE. DPI). Sistema de Informações Geográficas (SGI/INPE), V.2.0., São José dos Campos, Nov. 1987.
- Jardim de SÁ, E.F. A evolução proterozóica da Província da Borborema. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 11., Natal, 1984. Atas. Natal, SBG-NE, 1984, p.297-316. (Boletim 9).
- Kileen, P.G. Gamma ray spectrometric methods in uranium exploration-application and interpretation. In: Hood, J.P., ed. Geophysics and Geochemistry in the Search for Metallic Ores. Ottawa, Geological Survey of Canada, (Economic Geology Report, 31), 1979, p. 163-229.
- Kowalik, W.S., Glenn, W.E. Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. Geophysics, 52(7):875-884, July 1987.
- Knapp, E. M. Spatial data integration In: Freeman, H.; Goffredo G., ed. Map data processing. New York, NY, Academic, 1980. p. 47-61.
- Marble, D.A. Geographic Information System: an overview. In: Pecora Symposium on Spatial Information Technologies for Remote Sensing Today and Tomorrow, Sioux Falls, SD, Oct. 2-4, 1984. Proceedings. Silver Spring, MD, IEEE Computer Society, 1984, p. 18-24.
- Marek, F. Magnetometric methods. In: Stanislav, M., ed. Introduction to applied geophysics. Netherlands, D. Reidel, 1984. p. 71-153.

- Marston, R.A.; Goodell, P.C.; Hoffer, R.L.; Keller, G.R.
On integrated Landsat-geological-geophysical-geochemical
survey for mineral occurrence in West-Central Utah. In:
International Symposium on Remote Sensing of Environment,
Thematic Conference Remote Sensing for Exploration
Geology, 2., Forth Worth, TX, Dec 6-10. Proceedings.
Ann Arbor, MI, ERIM, 1982. v. 2, p. 843-851.
- Matolín, M. Radiometric Methods and Methods of Nuclear
Geophysics. In: Stanislav, M. ed. Introduction to
applied geophysics. Netherlands, D. Reidel, 1984.
p.154-231.
- Matos, J.T. Caracterização do comportamento geológico-
estrutural na região da represa de Furnas (MG) com dados
de sensoriamento remoto. (Tese de Doutorado) - USP.
Instituto de Geociências, São Paulo, 1986. 181p.
- Maurice, Y.T.; Charbonneau, B. U e TH concentration
processes in Canadian granitoids, their detection by
airborne gamma-ray spectrometry and their relationship to
granophile mineralization. Revista Brasileira de
Geociências, 17(4):644-646, Dez. 1987.
- Mello, A.A.de.; Costa, A.C.; Mendes, V.A.; Hama, M.
Elementos tectono-estruturais do Nordeste meridional-
Parte Oriental dos Estados da Paraíba e Pernambuco. In:
Simpósio de Geologia do Nordeste, 8., Campina Grande,
SBG, 1977. Atas. Campina Grande, SBG, 1977, p.3343-363.
- Meneses, P.R. Avaliação e seleção de bandas do sensor
"Thematic Mapper" do LANDSAT-5 para discriminação de
rochas carbonáticas do Grupo Bambuí como subsídio ao
mapeamento de semidetalhe. (Tese de Doutorado em
Geologia) - USP. Instituto de Geociências, São Paulo,
1986. 233p.

- Nevitt, C.; Barr, M. Composite colour images of airborne spectrometric data. Mining Magazine, 152(3):217-219, Mar. 1985.
- Paradella, W.R. Discriminação de unidades litológicas no baixo vale do rio Curaçá (Bahia), através de realces por processamento digital de dados MSS/LANDSAT 3. (Tese de Doutorado em Geologia Geral e de Aplicação) - IGUSP, São Paulo, 1983. 250p.
- Paradella, W.; Silva, M.F.F. da; Rosa, N. de A; Gouveia, J.L. Aplicação de dados de sensores remotos integrados com modelo digital de elevação na pesquisa geobotânica na Serra dos Carajás. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36., Natal, 1990. Anais. Natal, SBG, 1990. p.2394-2403.
- Paterson, D.J.; Walker, R.N. An application of image analysis of Landsat and geophysical data in a mineralised granite terrain, Northwest Queensland. In: Australasian Remote Sensing Conference, 3., Gold Coast, Queensland, 21-25 may 1981. Proceedings. Brisbane, Australia, Committee Landsat 84, 1984. p.412-449.
- Pettinati, F. Modelamento digital de terreno e representação gráfica de superfície. (Dissertação de Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, São Paulo, 1983.
- Pitkin, J.A.; Duval, J.S. Design parameters for aerial gamma-ray survey. Geophysics, 45:1427-1439, 1980.
- Poscolieri, M.; Lorenzini, M.; Onorati, G.E.; Salvi, S. Integrated Analysis of geological and remote sensing data aimed at mineral deposits detection in the Monapo area (Northern Mozambique). In: IGARSS'86 Symposium. Zurich, Sept. 1986. Proceedings. Paris, ESA, 1986, p.485-490. (ESA SP-254).

- PROJETO RADAMBRASIL. Folhas SB.24/25 Jaguaribe/Natal;
geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso
potencial de terra. Rio de Janeiro, 1981. p. 349-484.
- Quintanilla, J.A. Integração de dados geomorfológicos com
informação de imagens digitais para realce e
interpretação geológica. (Dissertação de Mestrado) -
IPT. Divisão de Minas e Geologia Aplicada. São Paulo,
1988. p.1-107. (Relatório n. 26679).
- Richards, J.A. Remote Sensing digital image analysis and
introduction. Berlim, Spring-Verlag, 1986. 281p.
- Rivereau, J.C. Curso de fotointerpretação; notas de aula
dadas na XI Semana de Estudos da Sociedade Internacional
da Escola de Geologia de Ouro Preto. Ouro Preto, 1970.
128p.
- Rodrigues, M. Introdução ao geoprocessamento In: Simpósio
Brasileiro de Geoprocessamento, São Paulo, 23-25 maio,
1990. Anais. São Paulo, USP. Escola Politécnica, 1990,
p 1-26.
- Salisbury, J.W.; Hunt, G.R. Martian surface materials:
effect of particle size on spectral behaviour. Science,
161(3839):365-366. 1968.
- _____. Remote Sensing of rock type in the visible and near
infrared. In: International Symposium on Remote Sensing
of Environment, 9., Ann Arbor, Apr. 1974. Proceedings.
Ann Arbor, MI, ERIM, 1974, V.3, p.1953-1958.
- Santos, E.J. dos Síntese da geologia do precambriano da
folha Arcoverde-Nordeste do Brasil. Recife, SUDENE,
1971. 33p.

- Santos, E.J. dos O modelo de evolução pré-cambriana da região de Arcoverde, Pernambuco. In: Simpósio de Geologia do Nordeste, 8., Campina Grande, SBG, 1977. Atas. Campina Grande, SBG, 1977, p.225-245. (Boletim 6).
- Santos, E.J.; Coutinho, M.G.N.; Costa, M.P.de A.; Ramalho, R. A região de dobramentos nordeste e a bacia do Parnaíba, incluindo o cráton de São Luís e as Bacias Marginais. In: Mapa geológico do Brasil escala 1/2.500.000, Geologia do Brasil; texto explicativo. Brasília, DNPM, 1984. 500p.
- Schowengerdt, R.A. Techniques for image processing and classification in remote sensing. New York, N.Y., Academic, 1983. 249p.
- Siegal, B.S.; Abrams, M.J. Geologic Mapping using Landsat data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 42(3):325-337. 1976.
- Silva, S.M.P. da; Veneziani, P. Estudo de técnicas de integração de dados para o mapeamento geológico da região de Igaraci(PE). Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 5., Natal, 11-15. Out., 1988.
- Singh, A; Harrison, A. Standardized principal components. International Journal of Remote Sensing, 6(6):883-896, June 1985.
- Slater, P.N. Remote sensing optics and optical systems. London, Addison-Wesley, 1980. 575 p.
- Soares, P.C.; Fiori, A.D. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia Geomorfológica, 16(32):107-121, 1976.

- Sousa, S.L. de Aspectos geológicos e hidrogeológicos nos arredores de Jabitacá-PE. Recife, UFPE. Escola de Geologia, 1972. 25p.
- Steffen, C.A.; Lorenzetti, J.A.; Stech, J.L. Princípios físicos de sensoriamento remoto. In: Curso de treinamento: introdução as técnicas de sensoriamento remoto e aplicações São Jose dos Campos, INPE, 1980. cap.1, p.I-1-I-31. (INPE - 1869-MD/004).
- Taranik, J.K. Principles of computer processing of Landsat data for geological applications. Washington, DC, USGS, 1978. 49p. (USGS Open File Report. 78-117).
- Townshend, J.R.G. Agricultural land-cover discrimination using thematic mapper spectral bands. International Journal of Remote Sensing, 5(4):681-698, 1984.
- Townshend, J.R.G.; Gayler, J.R.; Hardy, J.R.; Jackson, M.J.; Baker, J.R. Preliminary analysis of Landsat-4 thematic mapper products. International Journal of Remote Sensing, 4(4):817-828, 1983.
- Veiga Jr., J.P. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, carta geológica, carta metalogenetica/previsional. Escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-C-VI Afogados da Ingazeira) - Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM/CPRM, 1989.
- Veneziani, P. Análise de movimentos da tectônica rúptil e rúptil-dúctil através da interpretação de produtos de sensores remotos na região do espinhaço meridional(MG): uma correlação com processos evolutivos. (Tese de Doutorado em Geologia Geral e de Aplicações) - USP. Instituto de Geociências, São Paulo, 1987. 172p.

Veneziani, P.; Anjos, C.E. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia. São José dos Campos, INPE, 1982. 54p. (INPE-2227-MD/014).

Wanderley, A.A. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional. Escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-D-IV Monteiro) - Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM/CPRM, 1989.

Wanderley, A.A.; Torres, H.H.F. Geologia estrutural. In: Wanderley, A.A. Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional. Escala 1:100.000 (Folha SB.24-Z-D-IV Monteiro) - Estados de Pernambuco e Paraíba. Brasília, DNPM, 1990. 100p. il. Cap.5 p.41-45.

Winge, M.; Banon, G.F.; Carneiro, P.J.R.; Cicatti, F.V. Análise multiespectral de unidades lito-estratigráficas do Brasil Central. Brasília, IBM. Centro Científico Brasília, 1986. 97p.

Yamamoto, J.K. Representações gráficas espaciais em geologia aplicações no Complexo Alcalino de Anitápolis. (Dissertação de Mestrado) - Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.

Yoely, P. Compilation of data for computer assisted relief cartography. In: Davis, J.G., McCullagh, M. J., ed. Display and analysis of spacial data. London, Wiley-Interscience, 1975. p.352-366.

Zhou, Q. A method for integrating remote sensing and geographic information systems. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55(5), :591 - 596, May 1989.

A P P E N D I C E A