

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS  
TM-LANDSAT 5 E GAMAESPECTROMÉTRICAS NO  
ESTUDO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA  
QUADRÍCULA CERRO AZUL, esc. 1:100.000  
(SG.22-X-B-IV)**

Sérgio Nobuo Godoy Saito

Orientador: Prof. Dr. Arlei Benedito Macedo  
Co-orientadores: Geólogo Msc. Carlos César de Araújo  
Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

Monografia de Trabalho de Formatura

SÃO PAULO  
1999

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900004576

**INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS  
TM-LANDSAT 5 E GAMAESPECTROMÉTRICAS NO  
ESTUDO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA  
QUADRÍCULA CERRO AZUL, ESC. 1:100.000  
(SG.22-X-B-IV)**

(TF/99 – 16)

Sérgio Nobuo Godoy Saito



Orientador: Prof. Dr. Arlei Benedito Macedo  
Co-orientadores: Geólogo Msc. Carlos César de Araújo  
Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

Monografia de Trabalho de Formatura

SÃO PAULO  
1999

5158  
SNG.i

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

INTEGRAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DE IMAGENS  
TR-LANDSAT 5 E GAMMAESPECTROMÉTRICAS NO  
ESTUDO GEOLÓGICO-ESTRUTURAL DA  
QUADRÍCULA CERRO AZUL, ESC. 1:100.000  
(SG 22-X-B-IV)  
(1982 - 19)



Sérgio Mouton Geyer Sano

Coordenador: Prof. Dr. Adalberto Baccaro  
Coordenadora: Geóloga MSc. Carlos César de Azevedo  
Prof. Dr. Gisele Aparecida Cruz Campagna

Ministério de Trabalho e Emprego

SÃO PAULO  
1982

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Arlei Benedito Macedo, pelo apoio e estímulo prestados em todas as fases do estudo.

À FAPESP pela bolsa de iniciação científica (97/07024-8) e ao Instituto de Geociências - USP, pelo suporte técnico.

Ao geólogo Msc. Carlos César de Araújo, pelas discussões sobre o trabalho, pela revisão do texto e pela ajuda no trabalho de campo.

Ao prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha, pelas discussões sobre a geologia da área e pela cessão de dados de campo.

Ao geólogo Msc. Marcelo Monteiro da Rocha, pela ajuda na impressão desses volumes e com o Abstract.

Ao pessoal da Sala de Projetos: George de Barros, Sérgio L. F. de Matos e Sérgio Vicente Liotte, pela convivência diária e ajuda dada para a impressão dos volumes finais, além das inúmeras risadas.

Aos meus amigos da turma de 1995: Aborto, Acnase, Apum, Deby, Fofoletti, Hinfeliz, Joe, Joleval, Kagohara, Lambida, Laffond, Nickie, Nunsei, Priscilla, Scarletti, Urina, Biscu, Cacá, Cabrito, Cisto, Cogu, Jacu, Leidi Di, Marinara, Mau-Comeu, Mineiro, Mona, Necrófila, Pedrita, Soda, Sopinha e Xerox.

Um agradecimento especial à aqueles amigos que me acompanham (aturam) desde o colégio: 99 e Fiat-Lux (*in memoriam*).

Aos agregados da turma de 1995: Di Quatro, Kapachão, Poenaroda, Metanol e Jacira.

À todos os outros amigos, do meio geológico ou não.

Aos professores e funcionários, que diretamente ou indiretamente, colaboraram com a minha formação.

Um agradecimento especial aos meus pais Satio e Fátima, que sempre me incentivaram, e aos meus irmãos, pela convivência diária.

## RESUMO

A quadrícula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV), localizada na porção sul do Estado de São Paulo e nordeste do Estado do Paraná, apresenta como características grandes áreas cobertas por mata atlântica, cobertura de solo espessa e elevado potencial para diversos bens minerais, porém possui regiões com poucos estudos geológicos e mapeamentos sistemáticos. Este trabalho tem como objetivo a utilização de produtos de sensoriamento remoto (imagens TM-Landsat 5) integrados digitalmente com informações gamaespectrométricas para o mapeamento geológico dessa região.

Foram realizadas as correções radiométrica, atmosférica e geométrica e o mosaico das imagens TM. Foi elaborado uma grade com os dados aerogeofísicos, utilizando-se o interpolador curvatura mínima. A integração das imagens TM e gamaespectrométricas (canais Contagem Total, Potássio, Urânio e as razões Th/K, U/K e U/Th), já realçadas, foi realizada através do método *pseudocolor colordrape*.

Os produtos integrados foram interpretados individualmente, e as diferentes interpretações foram comparadas para gerar o mapa de unidades integradas. Neste mapa, estão discriminados quatro domínios litoestruturais: o domínio das rochas ígneas, das rochas metassedimentares, do embasamento, e dos granitóides e gnaisses do Complexo Três Córregos. Alguns desses domínios estão subdivididos em sub-domínios. A correlação entre as unidades integradas e as litologias foi feita através de dados de campo, gerando o mapa geológico da área.

A principal contribuição deste trabalho é a subdivisão do Complexo Granítico Três Córregos em duas unidades, através de suas respostas gamaespectrométricas: a unidade TC1, aonde predominam rochas graníticas, e a unidade TC2, na qual predominam gnaisses.

Este trabalho realça a importância de se utilizar as imagens de sensoriamento remoto e dados aerogeofísicos integrados para o mapeamento geológico .

## ABSTRACT

The Cerro Azul quadrangle (SG.22-X-B-IV) is located at the south part of São Paulo State and northwest part of Paraná State. It is characterized by large areas covered by rain forest, deep soil covers and high potential for many mineral resources, but it still has regions with almost none geologic studies and systematized mapping. The objective of this paper is the geologic mapping through the use of remote sensing products (TM-LANDSAT 5 images) digitally integrated with airborne gamma ray information.

The radiometric, atmospheric and the geometric corrections were made and the mosaic of the TM images were also made. A grid containing the airborne geophysics has been made using the minimum curvature algorithm. The TM images and airborne gamma ray integration (Total count, Potassium, Uranium and Thorium channels and the Th/K, U/K, U/Th ratios), already enhanced were made through the pseudocolor colordrape method.

The integrated products were interpreted one by one and the different interpretations were compared in order to generate the integrated units map. In this map four litho-structural domains are shown: the igneous rocks domain, the metasedimentary rocks, the basement and the Três Corregos Complex granitic and gneiss rocks. Some of these domains are divided into other smaller portions. The correlation between the integrated units and the lithologies were made using field data which generates the geologic map of the area.

The main contribution of this paper is the division of the Três Corregos Granitic Complex into two units through its airborne gamma ray responses and field data: the TC1 unit, where predominates the granitic rocks and the TC2 unit where the predominant rocks are gneiss.

This paper shows and remarks the importance of the integration between remote sensing images and airborne gamma ray data to the geologic mapping.

# ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
<b>2. LOCALIZAÇÃO</b>	<b>2</b>
<b>3. GEOLOGIA DA ÁREA</b>	<b>3</b>
<b>4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>8</b>
4.1. SENSORIAMENTO REMOTO	8
4.1.1. CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS TM-LANDSAT 5	8
4.1.2. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS	9
4.2. GAMAESPECTROMETRIA	18
4.2.1. FUNDAMENTOS DE GAMAESPECTROMETRIA	18
4.2.2. RADIOATIVIDADE DAS ROCHAS	20
4.2.3. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS	21
<b>5. MATERIAIS</b>	<b>22</b>
5.1. MAPAS TOPOGRÁFICOS	22
5.2. PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS	22
5.3. DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS	22
5.4. DADOS DE CAMPO	24
<b>6. METODOLOGIA</b>	<b>25</b>
6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM-LANDSAT 5	25
6.1.1. CORREÇÃO RADIOMÉTRICA	25
6.1.2. CORREÇÃO ATMOSFÉRICA	25
6.1.3. CORREÇÃO GEOMÉTRICA	27
6.1.4. ELABORAÇÃO DO MOSAICO	27
6.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS	29
6.3. INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLÓGICA	30
6.4. INTEGRAÇÃO DIGITAL DOS DADOS	31
6.4.1. MÉTODO <u>PSEUDOCOLOR COLORDRAPE</u>	31
6.4.2. GERAÇÃO DOS PRODUTOS INTEGRADOS	32
<b>7. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO</b>	<b>33</b>
7.1. ATIVIDADES REALIZADAS	33

7.2. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	34
7.3. DIFICULDADES SURGIDAS	34
<b>8. RESULTADOS</b>	<b>35</b>
8.1. TRABALHO DE CAMPO	35
8.2. INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLÓGICA DA IMAGEM TM (1ª COMPONENTE PRINCIPAL)	37
8.3. INTERPRETAÇÃO DOS PRODUTOS INTEGRADOS 1ª CP TM E GAMA	39
8.3.1. FASE QUALITATIVA	39
8.3.2. FASE QUANTITATIVA	39
8.3.3. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DOS DOMÍNIOS GAMAESPECTROMÉTRICOS- TEXTURAIS INTERPRETADOS	48
<b>9. CONCLUSÕES</b>	<b>53</b>
<b>10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>

# ÍNDICE DE ANEXOS

## 1. INTRODUÇÃO

**Anexo 1** – Pontos de Campo

**Anexo 2** – Linhas de Vão

**Anexo 3** – Produto Integrado (Th/K) / CP 1 – TM

**Anexo 4** – Produto Integrado (U/K) / CP 1 – TM

**Anexo 5** – Produto Integrado (U/Th) / CP 1 – TM

**Anexo 6** – Mapa geológico

### 1.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo a obtenção, aquisição e interpretação das imagens TM (Landsat 5) e gamaespectrométricas, visando fornecer subsídios para uma análise compreensiva geológico-estrutural da quadrícula Cerra Azul. O produto final é um mapa geológico sendo a parte de interpretação dos produtos integrados a partir de campo.

### 1.2. Objetivos Específicos

1. Aquisição de imagens TM (Landsat 5) e Pontos de Campo (Cerra Azul) para um estudo preliminar da área, visando a interpretação geológica final.
2. Geração de produtos integrados TM (Landsat 5) e gamaespectrométricos, visando a obtenção de produtos integrados, que envolva o tratamento das cartas de organização espacial, o pré-processamento das imagens TM (correção radiométrica, atenuação atmosférica) e o processamento (realce e integração).
3. Interpretação visual de cada um dos produtos integrados gerando-os em domínio e a correlação dos domínios interpretados em cada uma das imagens para gerar um mapa de domínios geológicos preliminares.
4. Correlação das unidades gamaespectrométricas interpretadas com as unidades geológicas através dos pontos de campo, para gerar o mapa geológico da área.

## 1. INTRODUÇÃO

A região do Vale do Ribeira constitui-se em um sítio geológico de grande potencialidade econômica, pois concentra grandes reservas de minerais industriais (calcário, calcita, argila), e é a área de maior potencial para bens minerais metálicos nos estados de São Paulo e Paraná. Ela possui um grande conjunto de informações geológicas dispersas em várias instituições e historicamente é conhecida por ter sido grande produtora de diversos bens minerais.

Entretanto, grande parte dos estudos realizados na área foram direcionados para a pesquisa de mineralizações de chumbo, zinco e cobre. Ou seja, enquanto em algumas áreas há grande quantidade de informações, como mapeamentos geológicos de detalhe, dados geoquímicos e geofísicos, outras porções são praticamente desconhecidas.

A quadrícula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV), escala 1:100.000, abrange uma superfície de aproximadamente 2800 km<sup>2</sup> no sul do Estado de São Paulo e norte do estado do Paraná. A área se caracteriza pela geologia diversificada, porém em algumas porções desta não há mapeamento de detalhe e semi-detalhe, por dificuldades de acesso e falta de afloramentos. Este estudo visa a aplicação dos produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísica, devidamente tratados e integrados, no mapeamento geológico da área.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo o tratamento, integração e interpretação das imagens TM-Landsat 5 e gamaespectrométricas, visando fornecer subsídios para uma melhor compreensão geológico-estrutural da quadrícula Cerro Azul. O produto final é um mapa geológico gerado a partir da interpretação dos produtos integrados e dados de campo.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Interpretação da imagem TM-Landsat 5 (1ª Componente Principal) para um estudo tectônico da área, auxiliando na interpretação geológica final.

2. Geração de produtos integrados TM-Landsat 5/gama segundo a metodologia normalmente empregada, que envolve o tratamento dos dados aerogamaespectrométricos, o pré-processamento das imagens TM (correções radiométrica, atmosférica e geométrica) e o processamento (realce e integração).

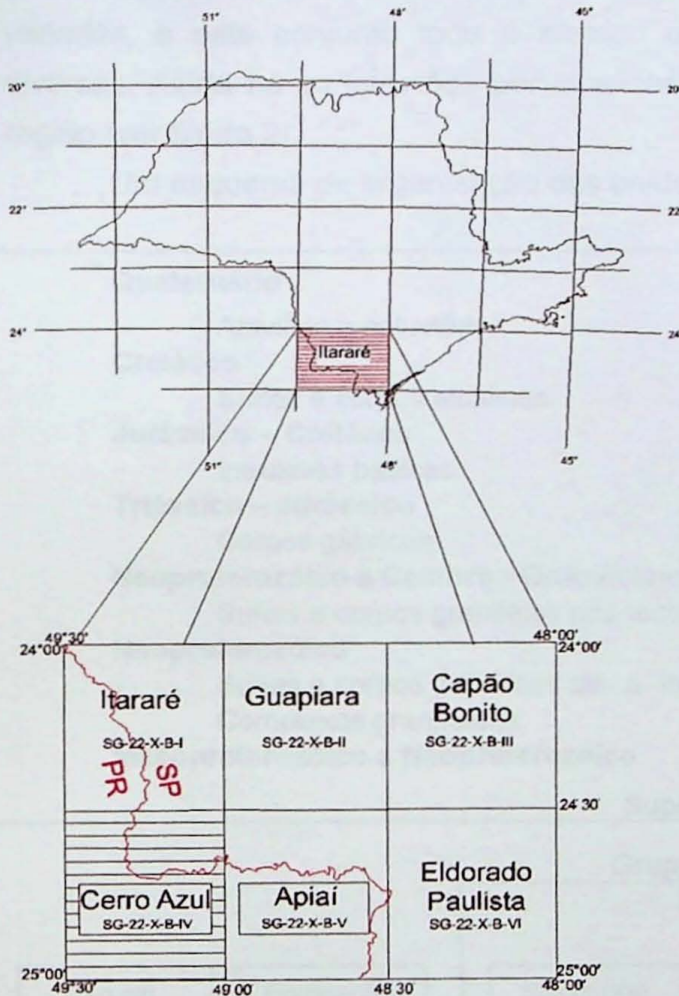
3. Interpretação visual de cada um dos produtos integrados, separando-os em domínios, e a sobreposição dos domínios interpretados em cada uma das imagens, para gerar um mapa de domínios gamaespectrométricos-texturais.

4. Correlação das unidades gamaespectrométricas interpretadas com as unidades geológicas através dos pontos de campo, para gerar o mapa geológico da área.

## 2. LOCALIZAÇÃO

A área estudada localiza-se no sul do Estado de São Paulo e nordeste do Estado do Paraná (figura 1), no Alto Vale do Ribeira de Iguape. É delimitada pelos paralelos  $24^{\circ} 30' S$  e  $25^{\circ} 00' S$ , e pelos meridianos  $49^{\circ} 00' W$  e  $49^{\circ} 30' W$ .

### Localização da Área de Estudo



Situação da Folha Itararé no Estado

Situação da Quadrícula Cerro Azul (1:100.000) na Folha Itararé (1:250.000)

Figura 1

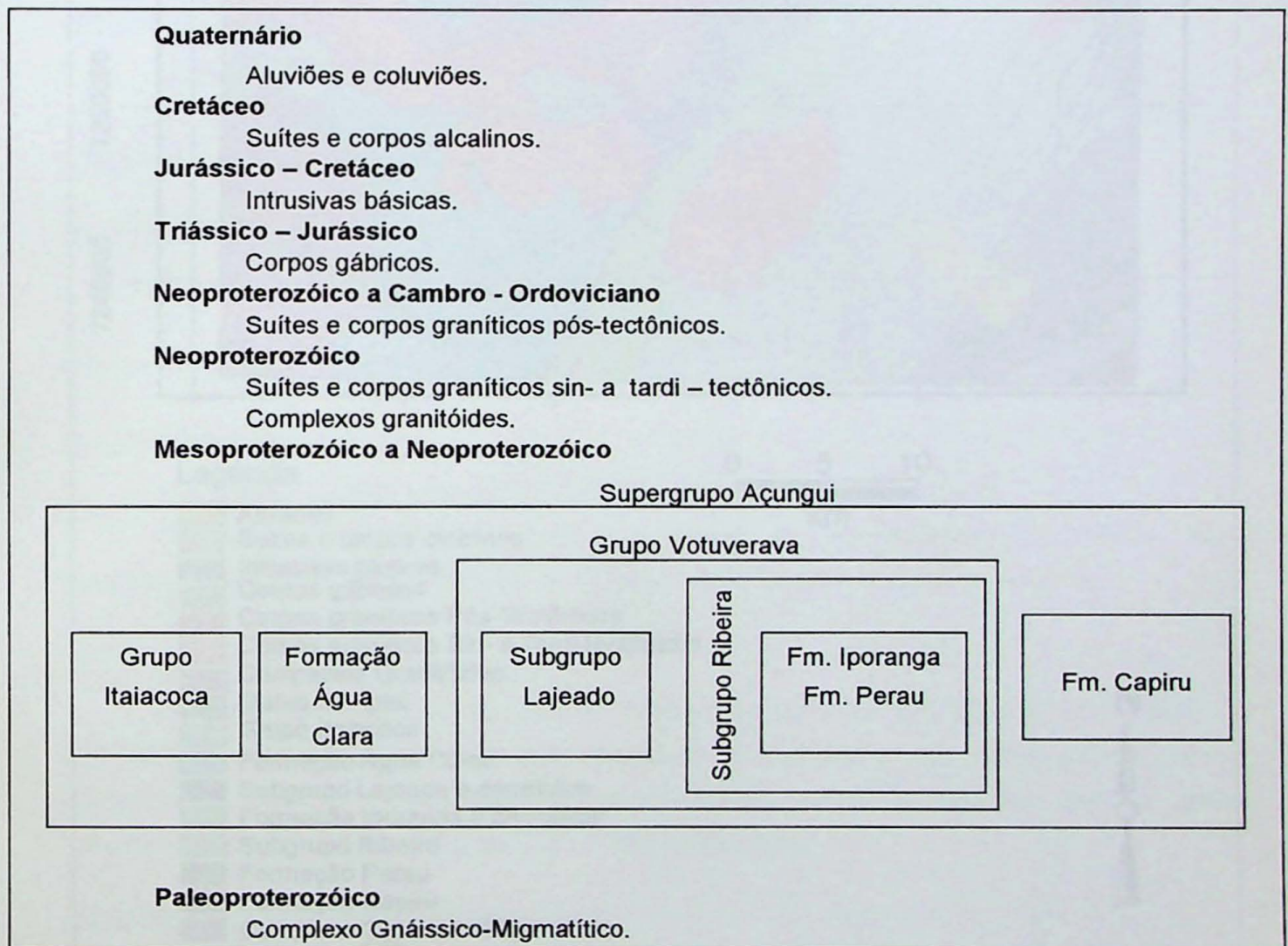
### 3. GEOLOGIA DA ÁREA

A geologia aqui descrita é baseada e adota o modelo proposto por Campanha *et al.* (1996) e Campanha (1991).

O embasamento regional é constituído por rochas gnáissico-migmatíticas, com núcleos chamockíticos e intercalações de metassedimentos. Sobrepostos ao embasamento encontram-se rochas supracrustais, metamorfasadas em grau fraco à médio, reunidas classicamente no Supergrupo Açungui.

Estas rochas apresentam-se intrudidas por corpos granitóides de características variadas, e este conjunto todo é afetado por falhas e dobramentos de características diversas. Ainda há as intrusões por alcalinas e básicas mesozóicas, que afetaram toda a região (ver figura 2).

Um esquema de organização das unidades estratigráficas da área é o seguinte:



Quadro 1 : Estratigrafia da área de estudo (Adaptado de Campanha *et al.*, 1996)

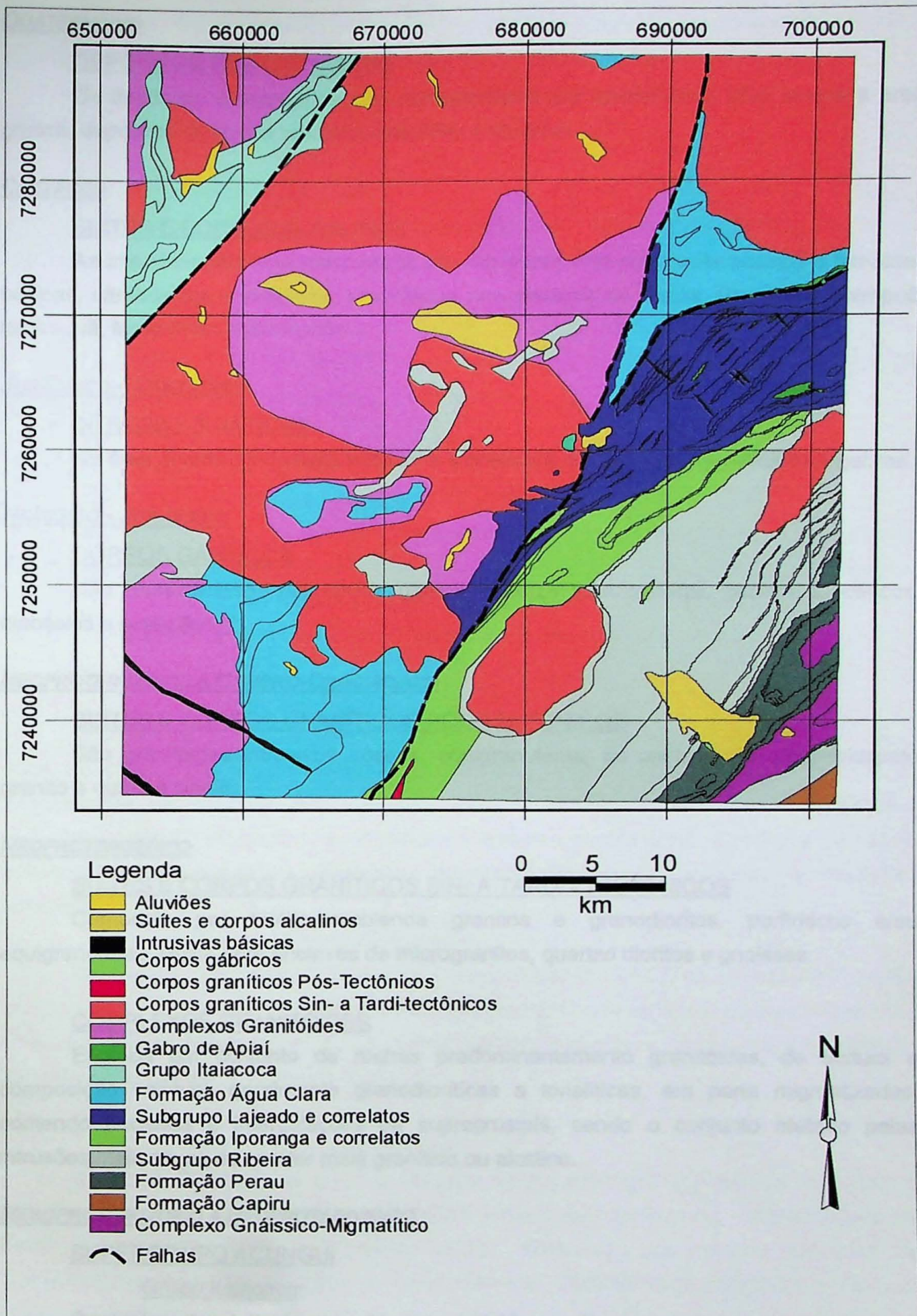


Figura 2: Geologia da área.  
(adaptado de Campanha *et al.*, 1996)

QUATERNÁRIODEPÓSITOS QUATERNÁRIOS

Os depósitos quaternários são representados por cascalheiras com blocos e areia grossa, depósitos de relevo cárstico, coluviões e aluviões.

CRETÁCEOSUÍTES E CORPOS ALCALINOS

As intrusivas alcalinas mesozóicas são representadas por diques básicos e intrusões básicas, ultrabásicas e alcalinas, associados aos maciços de Tunas, Barra do Itapirapuã, Itapirapuã, Mato Preto e Banhadão.

JURÁSSICO – CRETÁCEOINTRUSIVAS BÁSICAS

Na área ocorrem intrusivas básicas e a presença de diabásios, lamprófiros e gabros.

TRIÁSSICO - JURÁSSICOCORPOS GÁBRICOS

São representados por olivina gabros, quartzo monzogabros, gabros subofíticos, diabásios e essexitos.

NEOPROTEROZÓICO A CAMBRO-ORDOVICIANOSUÍTES E CORPOS GRANÍTICOS PÓS-TECTÔNICOS

São granitóides intrusivos, róseos, equigranulares, de composição álcali-feldspato granito e quartzo sienito.

NEOPROTEROZÓICOSUÍTES E CORPOS GRANÍTICOS SIN- A TARDI - TECTÔNICOS

Composto por biotita-hornblenda granitos e granodioritos, porfiríticos e/ou equigranulares, cinza, com enclaves de microgranitos, quartzo dioritos e gnaisses.

COMPLEXOS GRANITÓIDES

Engloba um conjunto de rochas predominantemente granitóides, de textura e composição variável, geralmente granodioríticas a tonalíticas, em parte migmatizadas, contendo enclaves e intercalações de supracrustais, sendo o conjunto afetado pelas intrusões mais novas de caráter mais granítico ou alcalino.

MESOPROTEROZÓICO A NEOPROTEROZÓICOSUPERGRUPO AÇUNGUIGrupo Itaiacoca:

Originalmente definido por Almeida (1956), o Grupo Itaiacoca é formado por mármore, geralmente dolomíticos e apresentando por vezes estruturas estromatolíticas. A dominância da sedimentação carbonática, por vezes apresentando pacotes de sedimentos

clásticos muito finos, sugere ambiente deposicional tranqüilo, provavelmente lagunas delimitadas por recifes, com pouca influência da sedimentação clástica.

Recentemente tem sido identificado vulcanismo ácido à básico, localmente ultrabásico, associado à Formação Itaiacoca.

#### Formação Água Clara:

Segundo Marini *et al.* (1967 *apud* Campanha *et al.*, 1996), a Formação Água Clara é composta basicamente por rochas carbonáticas impuras e calciossilicáticas, intercalados com metapelitos. A seqüência vulcânica é composta por anfibólio-xistos, metacherts, metatufos, granada-clorita-biotita xistos, metabasitos e comubianitos.

Possivelmente na sua porção basal ocorrem seqüências terrígenas formadas por quartzos xistos, micaxistos, quartzitos e paragnaisses.

#### Grupo Votuverava:

##### Subgrupo Lajeado:

O Subgrupo Lajeado engloba metassedimentos depositados em uma seqüência plataformal de águas rasas, porém não litorâneas, composto basicamente por espessos pacotes de composição carbonática e psamo-pelítica. Sua estratigrafia interna é reconhecida desde Barbosa (1941 *apud* Campanha *et al.*, 1996)

##### Subgrupo Ribeira:

O Subgrupo Ribeira, segundo Leonardos (1941 *apud* Campanha *et al.*, 1996), reúne metapelitos (ardósias, filitos e xistos), mais tipicamente metarritmitos finos, com numerosas intercalações de metabásicas, metavulcânicas, e em menor quantidade, quartzitos, carbonato pelitos, mármore e metaconglomerados oligomíticos. Destacam-se como indicadores paleoambientais pequenas formações ferríferas, metacherts e depósitos sulfetados.

##### Formação Iporanga:

Definida por Leonardos (1934 *apud* Campanha *et al.*, 1996), a Formação Iporanga é composta por metapelitos rítmicos predominantemente; ocorre em meio à estes metapelitos níveis e lentes de metabrechas e metaconglomerados polimíticos, com clastos de variados tamanhos e litologias, e de matriz lamítica.

##### Formação Perau:

A Formação Perau é dividida em dois níveis estratigráficos na sua área-tipo: o superior, constituído por um nível carbonático impuro que contém as mineralizações de Perau e outras correlatas; e o pacote inferior, constituído por pacotes espessos de quartzitos, por vezes interpretados como metacherts. Originalmente definida por Pierkarz (1981) e Takahashi *et al.*, 1981.

### Formação Capiru:

Semelhante à Formação Itaiacoca, corresponde a uma seqüência plataformal de águas rasas e litorâneas, com alternância de pacotes carbonáticos, psamíticos e pelíticos. A Formação Capiru foi definida por Bigarella & Salamuni, 1956.

### PALEOPROTEROZÓICO

#### COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMATÍTICO:

O Complexo Gnáissico-Migmatítico, na área de estudo, engloba migmatitos embrechíticos e nebulíticos, granito-gnaisses, migmatitos estromalíticos com paleossomas de anfibólio-biotita, biotita-hornblenda gnaisses predominantes, mica-quartzo xistos, ultrabasitas, metabasitos e anfibolitos subordinados, ortognaisses (a biotita, biotita-hornblenda, hornblenda e muscovita) de composição diorítica a granodiorítica, com intercalações de quartzitos, anfibolitos, metabasitos e metaultrabasitas.

Amostra	Localização espacial (km)	Profundidade (km)	Região de Espetro
1	20736	0,45 - 0,5	Vulcão (basalto)
2	20736	0,52 - 0,60	Vulcão (basalto)
3	20736	0,63 - 0,69	Vulcão (basalto)
4	20736	0,78 - 0,86	Intercalação (basalto - gneiss)
5	20736	1,56 - 1,75	Intercalação (basalto - gneiss)
6	120x120	10,40 - 12,50	Intercalação (basalto - gneiss)
7	20736	2,20 - 2,35	Intercalação (basalto - gneiss)

Tabela 1: Principais características das amostras TMA.

O estudo concentra-se na distribuição de mineralização, isto é, na relação entre a rocha e o fluido. Uma amostra típica de mineralização é a que ocorre em uma zona de convergência de 100 x 100 km.

A distribuição é de 2 km de esp. a 20 km de esp. de uma maneira contínua. Uma amostra típica de 100 x 100 km de 0,4 x 200.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1. SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto é a ciência e arte de se obter informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados obtidos por um aparelho que não esteja em contato com o objeto, área ou fenômeno sob investigação (Lillesand & Kiefer, 1994). Em outras palavras, o sensoriamento remoto trata da medição e registro de energia eletromagnética refletida ou emitida pela superfície do planeta e da atmosfera, além do relacionamento de tais medidas com a natureza, a distribuição dos materiais na superfície e as condições atmosféricas.

#### 4.1.1. Características das imagens TM-Landsat 5

O *Thematic Mapper* – TM – é um sensor imageador óptico, multiespectral, com alta resolução espectral, que se encontra instalado a bordo do satélite Landsat 5 (lançado em 1984). O sensor TM opera em 7 bandas do espectro magnético, que possuem numeração de 1 a 7. A tabela 1 apresenta as principais características das imagens geradas pelo sensor TM.

Bandas do TM	Resolução espacial (m)	Posição no Espectro ( $\mu\text{m}$ )	Região do Espectro
1	30X30	0,45 – 0,52	Visível (azul)
2	30X30	0,52 – 0,60	Visível (verde)
3	30X30	0,63 – 0,69	Visível (vermelho)
4	30X30	0,76 – 0,90	Infravermelho próximo (refletido)
5	30X30	1,55 – 1,75	Infravermelho (refletido)
6	120X120	10,40 – 12,50	Infravermelho termal (emitido – fora de operação)
7	30X30	2,08 – 2,35	Infravermelho (refletido)

**Tabela 1:** Principais características das imagens TM.

O satélite apresenta a característica de repetitividade, isto é, observa a mesma área a cada 16 dias. Uma imagem inteira do sensor representa no solo uma área de abrangência de 185 x 185 km.

A digitalização é de 8 bits, ou seja, a escala de níveis de cinza (também conhecido como *número digital* ou ND) varia de 0 a 255.

#### 4.1.2. Processamento Digital de Imagens

Com a tecnologia atual, os dados de sensoriamento remoto são gravados em formato digital. Por isso, grande parte das interpretações e análises em imagens de sensoriamento remoto envolvem técnicas de processamento digital. O processamento digital de imagens de sensoriamento remoto pode envolver numerosos procedimentos, incluindo formatação e correção dos dados, realce da imagem para facilitar uma melhor interpretação visual, ou classificação automática de alvos e feições pelo computador (Canadian Center for Remote Sensing – CCRS – , 1999).

Segundo INPE (1998), o processamento digital de imagens é normalmente dividido em três etapas: pré-processamento, realce e classificação.

**Pré-processamento** refere-se ao processamento inicial dos dados brutos para calibração radiométrica da imagem, correção de distorções geométricas e remoção de ruído.

**Realce** visa melhorar a qualidade da imagem, permitindo uma melhor discriminação dos objetos presentes na imagem.

Na **classificação** são atribuídas classes aos objetos presentes na imagem.

##### 4.1.2.1. Pré-processamento

De acordo com Richards (1993), quando uma imagem é armazenada pelos sensores dos satélites, ela contém erros em sua geometria e nos valores medidos de reflectância dos pixels. As *distorções geométricas* da imagem podem ser geradas por diversos motivos: curvatura da Terra, variações na altitude, velocidade e trajetória do sensor, e defeito e/ou deterioração no próprio sensor. Os erros nos valores de reflectância dos pixels são denominados de *erros radiométricos* e podem ser gerados por efeitos da atmosfera e pela instrumentação utilizada para a captura da imagem.

Porém, parte destes erros podem ser corrigidos através de técnicas de *pré-processamento*, que podem ser divididas em três amplas categorias: correção radiométrica, correção atmosférica e correção geométrica.

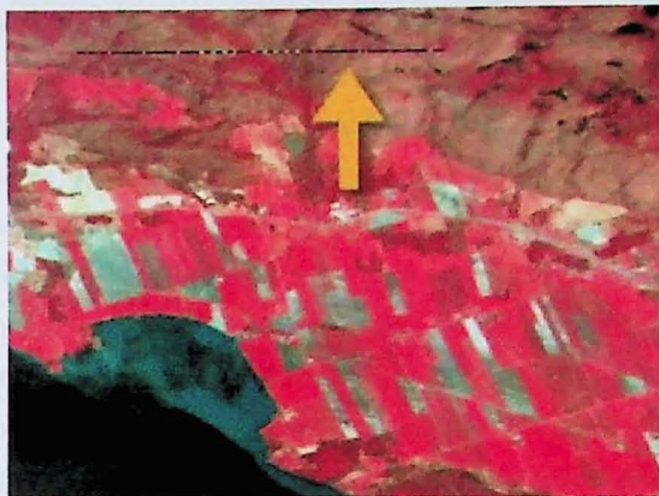
###### 4.1.2.1.1. Correção radiométrica

Os procedimentos para a correção radiométrica abrangem operações que visam melhorar a visualização da imagem.

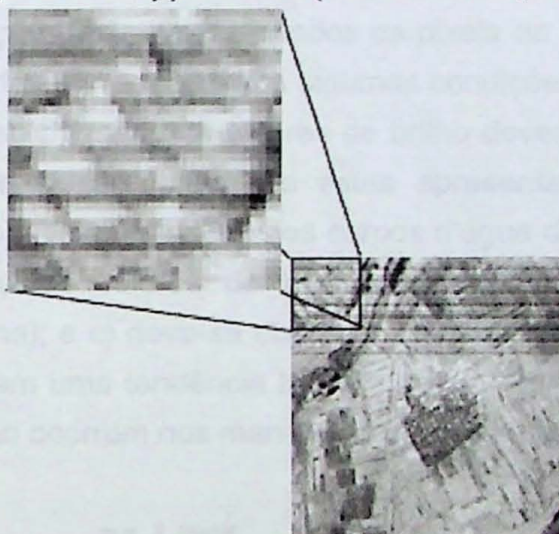
Segundo o CCRS (1999), neste conjunto de operações incluem-se processamentos que visam preencher a ausência de linhas de informação (*dropped lines*) ou os ruídos de varredura (*striping*). A ausência de linhas de informação (figura 3) consiste na ausência de valores registrados ao longo de toda uma linha de varredura, devido a problemas de saturação do detector, pane no sistema de registro ou na transmissão e/ou gravação dos dados. O método mais simples de correção deste ruído envolve a substituição do dado ausente pelo valor do pixel da linha precedente. Outra alternativa requer que o dado ausente seja substituído pela média dos pixels correspondentes nas linhas acima e abaixo da linha defeituosa.

Os ruídos de varredura (figura 4) são aqueles ruídos sistemáticos horizontais observados em imagens produzidas por varredores eletromecânicos como o MSS e o TM do programa Landsat. Estes padrões são mais aparentes quando vistos contra alvos de baixa radiância, como áreas de sombreamento, mares, etc.

A correção consiste na equalização dos histogramas de respostas dos detectores, isto é, na equalização das médias e dos desvios padrões dos detectores.



**Figura 3:** *Dropped lines* (Fonte: CCRS, 1999)



**Figura 4:** *Striping* (Fonte: CCRS, 1999)

#### 4.1.2.1.2. Correção atmosférica

A atmosfera modifica o fluxo de energia que alcança o sensor orbital de duas formas: adiciona ou subtrai brilho dos pixels devido ao espalhamento atmosférico.

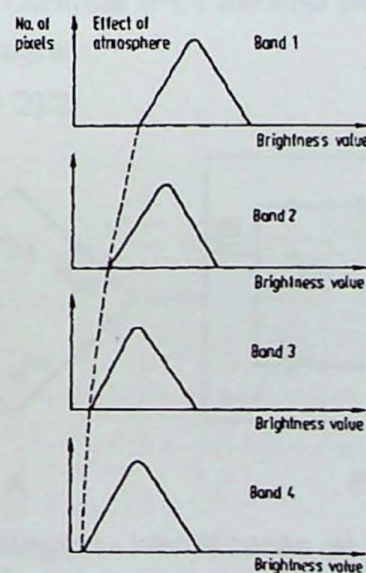
Segundo Richards (1993), são duas as principais formas de interferência da atmosfera nos produtos de sensoriamento remoto. A primeira é o espalhamento causado pelas próprias moléculas do ar. Este espalhamento é chamado de espalhamento de *Rayleigh* (adiciona valores de brilho) e é uma função inversa à quarta potência do comprimento de onda utilizado ( $1/\lambda^4$ ). O outro é chamado de espalhamento de *Mie* e é resultado do espalhamento da radiação por grandes partículas como aquelas associadas a vapores, fumaças e névoa, subtraindo valores de brilho. O espalhamento de Mie também

varia dependendo do comprimento de onda, porém não tanto quanto o espalhamento de Rayleigh. As partículas responsáveis pelo espalhamento de Mie são da ordem de 1/10 a 10 comprimentos de onda. Quando as partículas atmosféricas começam a ficar muito maiores que o comprimento de onda, como aquelas nas nuvens e poeiras, o espalhamento torna-se não seletivo, ou seja, não é mais dependente do comprimento de onda.

Segundo Richards (1993), este efeito é corrigido da seguinte maneira: primeiro assume-se que cada banda de uma dada cena deva conter alguns pixels cujos valores de reflectância são zero ou próximos a zero, mas que os efeitos da atmosfera, e especialmente do espalhamento de Rayleigh, são responsáveis por adicionar um valor  $x$  para cada pixel numa banda. Sendo assim, nos histogramas tomados de cada banda de uma dada cena, o menor valor de brilho normalmente não é zero, como mostrado na figura 6. Porém como o espalhamento de Rayleigh varia segundo  $\lambda^{-\alpha}$  (com  $\alpha$  variando entre 0 e 4 dependendo da extensão do espalhamento de Mie), o menor valor de brilho será mais distante da origem do histograma para os menores comprimentos de onda (ver figura 5).

Para a correção é necessário primeiro identificar a quantidade de brilho adicionada em cada histograma e subtrair esta quantidade do brilho de cada pixel na banda.

A técnica para correção envolve a identificação do valor do pixel mais escuro sobre corpos d'água, e a subtração deste valor de todos os pixels da mesma banda. Procede-se assim com as demais bandas. Porém, existem algumas condições de contorno: a) os corpos d'água na qual procuram-se os menores valores de brilho devem ser livres de material em suspensão, poluição e vegetação, para que estes apresentem valores de reflectância próximos ou igual a zero; b) verificar se todos os corpos d'água da mesma cena apresentam aproximadamente os mesmos valores de brilho (ou seja, a influência atmosférica é homogênea em toda a cena); e c) deve-se observar se os valores de brilhos coletados nas diversas bandas apresentam uma tendência logarítmica (ou aproximadamente), sendo que os maiores valores de brilho ocorrem nos menores comprimentos de onda.



**Figura 5:** Exemplo do efeito do espalhamento atmosférico nos quatro histogramas de uma imagem Landsat MSS (Fonte: Richards, 1993).

#### 4.1.2.1.3. Correção geométrica

Segundo Lillesand & Kiefer (1994), as imagens de sensoriamento remoto apresentam distorções geométricas tão significativas que impedem sua utilização como mapas. As fontes destas distorções vão desde variações na altitude, velocidade e atitude da plataforma do sensor, a fatores tais como distorção panorâmica, curvatura da Terra e disposição do relevo.

A correção geométrica pode ser entendida como a transformação dos dados de sensoriamento remoto de tal modo que eles adquiram as características de escala e projeção próprias de mapas (Mather, 1987).

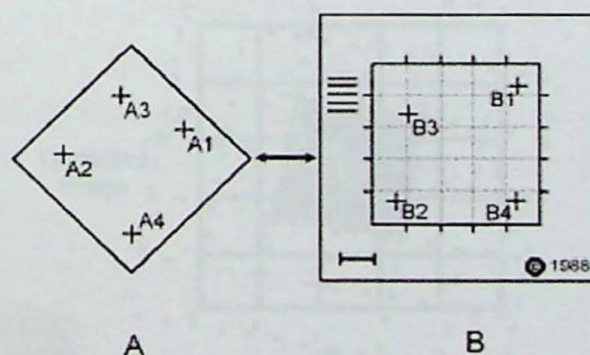
A correção geométrica é uma etapa importante devido a diversos fatores, entre os quais:

- elimina distorções sistemáticas das imagens;
- é necessária na aplicação das imagens em estudos multitemporais;
- na aplicação de imagens de sensoriamento remoto na integração de dados em sistemas de informação geográfica;
- integração de dados de sensoriamento remoto oriundos de diferentes plataformas.

O processo de correção geométrica, segundo o INPE (1998), pode ser feita através de diferentes modelos matemáticos. Entre eles destacam-se o modelo polinomial, o qual é baseado no mapeamento entre uma imagem e um conjunto de pontos de controle através de transformações polinomiais. Estes pontos de controle (chamado também de *ground control points* ou *GCPs*) podem ser obtidos a partir da imagem a ser registrada e um mapa (figura 6), ou ainda, de uma imagem (registrada) e uma imagem bruta. Este método, denominado registro de imagem, requer um número mínimo de pontos de controle bem distribuídos em função do grau do polinômio que fará a aproximação entre a imagem bruta e os pontos coletados, gerando assim uma imagem corrigida.

O número de Pontos de Controle (PC) mínimo para determinação de um polinômio de grau  $n$  é dado pela seguinte regra:

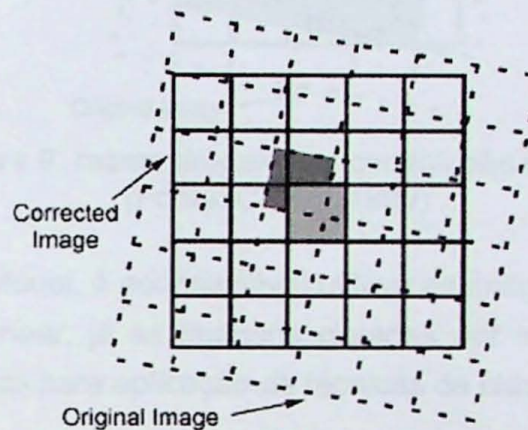
- $N.º \text{ GCPs} = (n^2 + 3n + 2)/2$



**Figura 6:** registro da imagem - identificação de pontos inconfundíveis na imagem bruta (A) e dos mesmos pontos em um mapa (B).  
(Fonte: CCRS, 1999)

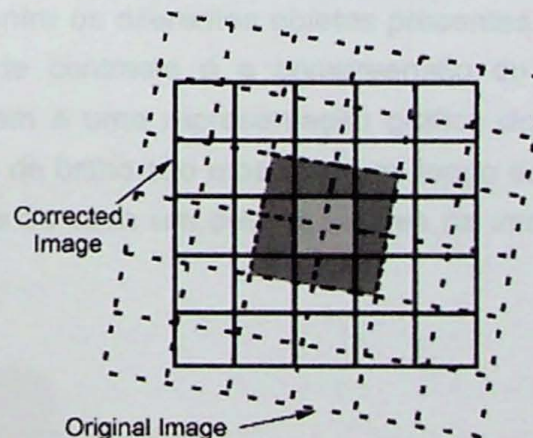
A partir da nova grade corrigida é necessário preencher o novo espaço geométrico, e isto é feito através de procedimentos de amostragem e interpolação.

De acordo com Shimabukuro *et al.* (1998), são três os métodos de interpolação mais utilizados no processo de reamostragem, sendo que a escolha do método mais adequado varia de acordo com o tipo de imagem a ser reamostrada e da aplicação que se dará aos dados. O primeiro método de interpolação é conhecido pelo nome de *vizinho mais próximo* (ver figura 7), pois a atribuição de nível digital da cena distorcida para a cena corrigida consiste em escolher o pixel correspondente à coordenada mais próxima. Apesar da simplicidade e rapidez de processamento do método, este apresenta algumas desvantagens: quando a distorção da imagem é muito grande, a imagem pode apresentar “blocos”, ou seja, porções onde não há variação do valor do pixel.



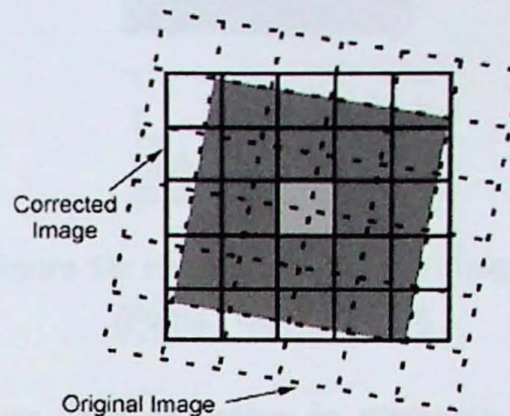
**Figura 7:** reamostragem por vizinho mais próximo.  
(Fonte: CCRS, 1999)

Outro método de reamostragem é conhecido por interpolação bilinear. Neste, o valor do pixel na nova grade é determinado pela média ponderada pela distância dos quatro pixels vizinhos (ver figura 8). A interpolação resulta numa imagem mais suavizada em relação à imagem original, sendo que os limites dos objetos se tornam mais difusos. Porém, segundo Shimabukuro *et al.* (1998), por se utilizar de uma média dos valores dos pixels, parte da informação espectral é perdida.



**Figura 8:** reamostragem por interpolação bilinear.  
(Fonte: CCRS, 1999)

O terceiro método é denominado convolução cúbica. O método se assemelha ao da interpolação bilinear, porém o valor do pixel da grade corrigida é a média ponderada pela distância dos 16 pixels vizinhos (ver figura 9). Este tipo de reamostragem gera uma imagem com aspecto visualmente mais natural, mas resulta em perda de informações de alta frequência (Shimabukuro *et al.*, 1998).



**Figura 9:** reamostragem por convolução cúbica.  
(Fonte: CCRS, 1999)

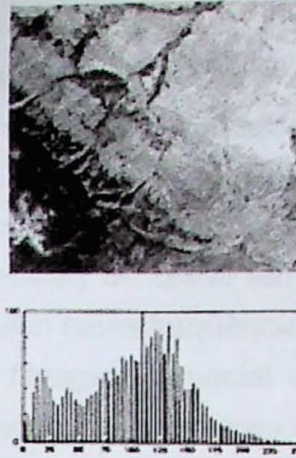
Para interpretação visual, é aconselhável utilizar as imagens geradas por convolução cúbica ou interpolação bilinear, já as imagens geradas por interpolação do vizinho mais próximo são mais adequadas para aplicação de técnicas de classificação.

#### 4.1.2.2. Técnicas de realce

##### 4.1.2.2.1. Ampliação de contraste

Segundo CCRS (1999), a técnica de realce de contraste tem como objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios do olho humano.

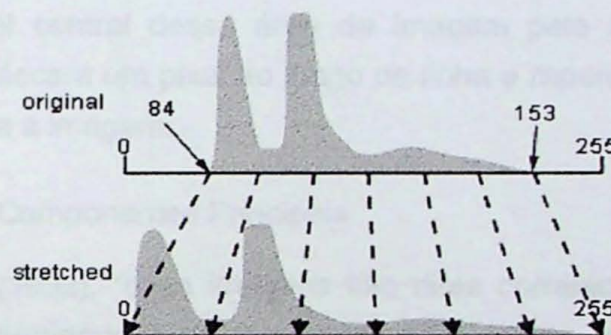
Nas imagens, os dados ocupam somente uma porção da escala disponível de valores de brilho (normalmente 8 bits ou 256 níveis). O realce de contraste envolve mudanças nos valores originais de forma a ocupar toda a escala de níveis de cinza, aumentando o contraste entre os diferentes objetos presentes na imagem. A chave para o entendimento do realce de contraste é a compreensão do conceito de *histograma*. O histograma de uma imagem é uma representação gráfica dos valores de brilho contidos numa imagem. Os valores de brilho são mostrados ao longo do eixo x do gráfico, enquanto a frequência de ocorrência de cada um desses valores na imagem aparece no eixo y (ver figura 10).



**Figura 10:** Histograma de uma imagem.

(Fonte: CCRS, 1999)

Pode-se aplicar vários tipos de realce de contraste numa imagem (graficamente representado pelo seu histograma). O método mais simples de realce de contraste é o *realce linear de contraste*. O método envolve a identificação dos limites inferior e superior de um histograma (normalmente os menores e maiores valores de brilho na imagem, respectivamente) e a aplicação de uma transformação que expanda o intervalo original de informação para toda a escala de 256 níveis (ver figura 11).



**Figura 11:** Realce linear de contraste

(Fonte: CCRS, 1999)

#### 4.1.2.2.2. Operações Aritméticas

São operações realizadas pixel a pixel entre imagens de bandas diferentes, através de uma regra matemática definida, tendo como resultado uma imagem representando a combinação das bandas originais.

As operações mais comuns são a soma, subtração e divisão de bandas, e a multiplicação de uma banda por uma constante. Geralmente a operação de adição é utilizada para realce das similaridades entre as bandas; e as operações de subtração, divisão e multiplicação, utilizadas para realçar as diferenças espectrais das bandas.

#### 4.1.2.2.3. Filtragem

A filtragem espacial engloba outro conjunto de ferramentas que são utilizados para melhorar a aparência da imagem. Os filtros espaciais são feitos para suprimir ou realçar feições específicas numa imagem, baseado na sua *freqüência espacial*. O conceito de freqüência espacial se refere a freqüência nas variações no brilho que ocorrem numa imagem. Locais com mudanças bruscas de brilho têm alta freqüência espacial, enquanto locais com brilhos constantes possuem baixa freqüência espacial.

Segundo Crósta (1992), a filtragem espacial de freqüências consiste em realçar seletivamente as feições de alta, média ou baixa freqüência que compõem as imagens de sensoriamento remoto. São geralmente empregadas para o realce de bordas, feições lineares de determinadas direções e padrões de texturas.

São duas as maneiras de filtragem de freqüências: por convolução, que opera no domínio espacial de uma imagem, ou a Análise de Fourier, que opera no domínio das freqüências que compõem a imagem. Devido à complexidade da Análise de Fourier, será abordada aqui apenas a filtragem por convolução.

O procedimento de filtragem comumente envolve a movimentação de uma janela (ou máscara) de poucos pixels (3x3, 5x5, por exemplo) sobre cada pixel na imagem. Posiciona-se a janela sobre o canto superior esquerdo da imagem, multiplica-se cada ND da área coberta pela máscara pelo respectivo valor das celas da máscara, substituindo-se em seguida o valor do pixel central dessa área da imagem pela soma das multiplicações realizadas. Move-se a máscara um pixel ao longo da linha e repete-se a operação. Realiza-se esta operação em toda a imagem.

#### 4.1.2.2.4. Análise por Componentes Principais

Segundo Crósta (1992), “duas imagens são ditas correlacionadas quando, dada a intensidade de um determinado pixel em uma delas, pode-se deduzir com razoável aproximação a intensidade do pixel correspondente na outra imagem”.

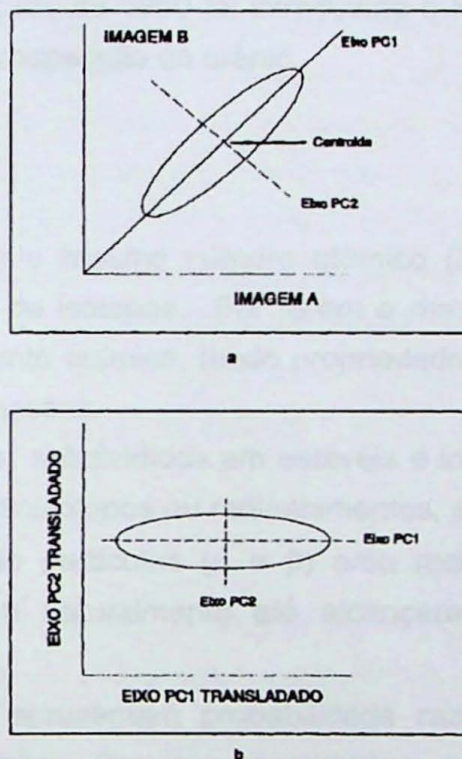
Em um gráfico de atributos, a correlação entre imagens se apresenta como pontos distribuídos ao longo da reta de direção próxima à diagonal principal. No caso de uma correlação parcial, a distribuição dos pontos toma forma elipsoidal (Crósta, 1992).

A análise por Componentes Principais é resumida como: dado um certo número N de imagens brutas, serão analisadas as correlações entre si para a produção de um novo conjunto de N novas imagens, com nenhuma correlação entre si. Esse novo conjunto de imagens terá as seguintes características: a primeira componente principal (ou PC1) irá conter a informação que é comum a todas as bandas, sendo que as PCs de ordem mais altas conterão feições cada vez menos significantes, até a última PC, que concentrará a informação que sobrar.

A figura 13 apresenta uma representação gráfica da transformação por componentes principais, num espaço de atributos bidimensional. A tendência alongada da distribuição é

causada pela correlação entre as duas imagens, e o espalhamento em volta da diagonal é originado pelas diferenças espectrais das duas imagens.

Segundo Crósta (1992), a transformação por componentes principais funciona da seguinte forma: primeiramente determina-se a direção relativa ao centróide que possui a máxima variância ou espalhamento, atribuindo-se à ela o eixo da PC1. Em seguida determina-se a direção relativa ao centróide que possui a segunda maior variância, com a condição que ela deva ser ortogonal em relação à primeira direção, atribuindo-se a essa segunda direção o eixo da PC2. Por último rotaciona-se a distribuição do espaço de atributos em volta do centróide, até que cada uma das direções encontradas fique paralela a um dos eixos originais (ver figura 12).



**Figura 12:** Transformação por Principais Componentes – a) Determinação bidimensional dos eixos das PCs; b) Rotação dos eixos das PCs (Fonte: Crósta, 1992)

Na prática, esse processo é implementado algebricamente usando-se os coeficientes de correlação ou as covariâncias para se determinar um conjunto de quantidades conhecidas por auto-valores, que representam o comprimento dos eixos das PCs de uma imagem e são medidas em unidades de variância. Associados com cada auto-valor, existe um outro conjunto de quantidades, que é na verdade um conjunto de coordenadas, chamados de auto-vetores, que representam as direções dos eixos das PCs. Os auto-vetores servem como fatores de ponderação que definem a contribuição de cada banda original para uma PC, numa combinação aditiva e linear (Crósta, 1992).

Observando-se a figura 12, nota-se que o espaço de atributos das imagens PC não é muito grande. A quantidade de informação em cada PC é fornecida pelo respectivo auto-vetor. Em imagens multiespectrais, cada sucessiva PC possui menos informação que as suas predecessoras. Quando as imagens PCs são submetidas a um aumento de contraste,

no sentido de se obter uma mesma variância para a 1 e a 2 PCs, o espaço de atributos será consideravelmente ampliado, permitindo uma melhor diferenciação dos materiais superficiais.

## 4.2. GAMAESPECTROMETRIA

### 4.2.1. Fundamentos de Gamaespectrometria

A radioatividade, descoberta em 1896 por Becquerel, é largamente utilizada em pesquisa mineral e mais recentemente em mapeamento geológico. Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), somente na década de 1950 foi introduzido o levantamento aerocintilométrico no Brasil, com o objetivo de prospecção de urânio.

#### RADIAÇÃO GAMA

Átomos que possuem o mesmo número atômico (Z), mas diferentes valores de nêutrons (N), são chamados de isótopos. Por terem o mesmo número atômico, isótopos são átomos do mesmo elemento químico, tendo propriedades químicas muito semelhantes e diferindo apenas em suas massas.

Os isótopos podem ser subdivididos em estáveis e instáveis. Os isótopos instáveis, conhecidos também como radioisótopos ou radioelementos, sofrem transformações naturais que resultam em emissão de partículas ( $\alpha$  e  $\beta$ ) e/ou radiação eletromagnética ( $\gamma$ ). Os radioisótopos se desintegram naturalmente até alcançarem uma configuração nuclear estável.

As partículas  $\alpha$  e  $\beta$  apresentam probabilidade razoável de colisão com outras partículas, pois possuem massa. Por isso, apresentam pequeno poder de penetração (alguns metros no ar).

Os raios  $\gamma$  correspondem a uma radiação eletromagnética de comprimento de onda ( $\lambda$ ) muito pequeno e de alta energia. Devido a ausência de massa, apresentam um grande poder penetrativo (centenas de metros no ar). Em virtude do seu maior poder de penetração, os raios gama são utilizados para a medição da radioatividade nos levantamentos aerogeofísicos.

A emissão da radiação gama carrega quantidades de energia que são específicas da desintegração do radioisótopo. Os raios  $\gamma$  são emitidos em pacotes de quanta de energia, chamados fótons. A energia de cada fóton (E) é dada pela fórmula:

$$E = hc/\lambda$$

onde: h é a constante de Planck; c é a velocidade da luz, e  $\lambda$  o comprimento de onda da radiação eletromagnética. A unidade utilizada para medidas gamaespectrométricas é o elétron-volt (eV).

## FONTES DE RADIAÇÃO GAMA

Dos 325 nuclídeos naturais, 274 são estáveis e 51 instáveis. A maioria dos nuclídeos instáveis estão distribuídos em três famílias radioativas que se desintegram em cadeias. São a família do  $^{232}\text{Th}$ , a família do  $^{238}\text{U}$ , e a família do  $^{235}\text{U}$ , que produzem no final o  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  e  $^{207}\text{Pb}$ . Além desses radioelementos, o  $^{40}\text{K}$  também possui desintegração natural, transformando-se em  $^{40}\text{Ca}$  e  $^{40}\text{Ar}$ .

Nas medições gamaespectrométricas, pode-se medir a intensidade dos raios gama emitidos por um elemento intermediário (*filho*) na série de desintegração e correlacioná-la com a concentração do elemento *pai*, assumindo que existe uma relação direta entre o teor dos elementos *filho* e *pai*. Essa condição somente é válida quando a série de desintegração se encontra em estado de equilíbrio. Considera-se uma série radioativa em equilíbrio quando o número de átomos *filhos* que se desintegram por segundo é o mesmo número de átomos filhos criado pela desintegração do elemento pai (Vasconcellos *et al.*, 1994).

Na série de desintegração do  $^{238}\text{U}$ , o próprio urânio não emite raios gama. Assim, para determinar o teor de urânio, utiliza-se a radiação emitida pelo elemento *filho*  $^{214}\text{Bi}$ . Já na série de desintegração do  $^{232}\text{Th}$ , os raios gama medidos originam-se na desintegração do  $^{238}\text{Tl}$ , pois o próprio  $^{232}\text{Th}$  não emite radiação gama. O potássio é registrado através dos raios gama emitidos pela desintegração do isótopo  $^{40}\text{K}$ .

### Fontes naturais de radiação

O potássio, U e Th são os únicos elementos cujos radioisótopos produzem raios gama de suficiente energia e intensidade para serem medidos por levantamentos aerogamaespectrométricos.

O  $^{40}\text{K}$  contribui com aproximadamente 98% da emissão total dos radioisótopos primários da crosta, e representa 0,012% do  $K_{\text{total}}$ .  $^{232}\text{Th}$  representa 100% do  $\text{Th}_{\text{total}}$ . O radioisótopo  $^{238}\text{U}$  representa 0,057% do  $U_{\text{total}}$ , enquanto o radioisótopo  $^{235}\text{U}$  representa 0,0007% do  $U_{\text{total}}$ .

Segundo Dickson & Scott (1997), o potássio é um dos principais componentes da crosta da Terra (2,35%), sendo encontrado principalmente em feldspatos potássicos (principalmente ortoclásio e microclínio) e micas (biotita e muscovita). Consequentemente, o teor de K é maior nas rochas félsicas (granitos, etc.) do que em relação às rochas máficas e ultramáficas.

O urânio está presente na crosta terrestre em concentração média de 3 ppm. Segundo Dickson & Scott (*op. cit.*), o urânio pode ser encontrado em quantidades traço em minerais principais como feldspatos e quartzo, e em concentrações maiores em minerais acessórios como monazita, zircão, epidoto, apatita, uraninita.

O tório está presente na crosta terrestre em concentração média de 12 ppm, e pode ser encontrado na allanita, monazita e zircão em grandes quantidades (> 1000 ppm) ou

como quantidades traço nos principais minerais formadores de rocha (Dickson & Scott, 1997).

#### 4.2.2. Radioatividade das Rochas

A radioatividade das rochas ígneas apresenta uma considerável variação em função das características químicas, mineralógicas, petrográficas e estruturais. Os níveis radioativos das rochas ígneas podem ser correlacionados a alguns fatores tais como: conteúdo em sílica, idade relativa numa série consangüínea e, posição dentro de um único *plúton* (Vasconcellos *et al.*, 1994). Dickson & Scott (1997) explicam que há um aumento no conteúdo de elementos radioativos juntamente com o aumento no conteúdo de SiO<sub>2</sub>. Mas, geralmente Th apresenta um crescimento maior que o U, e razões como Th/U podem ser utilizadas para investigar o grau de diferenciação dentro de suítes ígneas. A tabela 2 apresenta alguma o conteúdo de K, Th e U nos diferentes tipos de rochas.

Rocha	Th (ppm)	U (ppm)	K (%)	Th/U	K/U	Th/K
<i>Ígnea</i>						
Ultrabásica	0.02	0.007	0.01	2.8	1.4	2.0
Básica	3.4	0.8	1.0	4.3	1.3	3.4
Básica – Intermediária	6.1	1.7	1.9	3.6	1.1	3.2
Intermediária	9.8	3.0	2.4	3.3	0.8	4.1
Intermediária – Ácida	16.0	3.6	3.0	4.4	0.8	5.3
Ácida	21.9	4.1	3.5	5.3	0.9	6.3
<i>Sedimentar</i>						
Calcários	1.6	1.6	0.3	1.0	0.2	5.9
Arenitos	5.7	1.9	1.2	3.0	0.6	4.8
Folhelhos	11.2	3.7	2.7	3.1	0.7	4.1
<i>Metamórfica</i>						
Anfibolito	2.0	0.9	0.6	2.2	0.7	3.3
Gnaisses	10.6	2.3	3.4	4.6	1.5	3.1
Xistos	13.5	4.1	2.5	3.3	0.6	5.5

**Tabela 2:** Conteúdo médio de K, Th e U em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas.

(Fonte: Galbraith & Saunders, 1983)

Segundo Dickson & Scott (1997), as rochas sedimentares possuem a sua radioatividade relacionada com o material que foi depositado. São fatores a mobilidade do urânio e a insolubilidade do tório.

O urânio, devido a sua maior mobilidade, pode ser transportado dissolvido em águas superficiais ou subterrâneas. O urânio pode migrar dentro da bacia de sedimentação quando está em solução, e em ambientes redutores, os compostos de urânio podem ser precipitados enriquecendo epigeneticamente os sedimentos. Dos principais minerais que contêm urânio, somente o zircão e a monazita são estáveis durante o intemperismo, podendo ser transportado juntamente com sedimentos por ação mecânica.

Os compostos de tório são insolúveis, podendo permanecer no local onde as rochas sofreram intemperismo, ou serem transportados por águas correntes por ação mecânica.

A radioatividade de rochas metamórficas correspondem predominantemente às propriedades do material de origem. Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), o urânio e o potássio são considerados altamente envolvidos nas atividades metassomáticas, enquanto o tório não. Sob condições de metamorfismo de baixo grau, não há muita alteração na concentração dos três radioelementos. Já sob condições de metamorfismo de alto grau, geralmente considera-se que essas rochas apresentam uma concentração menor de tório e urânio devido ao movimento para cima das fases ricas em sílica.

#### 4.2.3. Interpretação dos dados Aerogamaespectrométricos

A interpretação dos dados gamaespectrométricos tem por objetivo delimitar áreas com diferentes níveis de radioatividade do K, Th, U e do canal de contagem total, elaborando desse modo mapas de unidades radiométricas (Vasconcellos *et al.*, 1994). Porém, uma vez que 98% da radiação emanada pela superfície da Terra corresponde aos primeiros 35 cm da superfície da Terra, o mapa de unidades radiométricas refletem somente os materiais que estão a poucos centímetros de profundidade, fazendo com que sua correlação com a geologia leve em conta, principalmente, a química do solo, que nem sempre é similar à da rocha em subsuperfície, desde que os solos tenham sofrido alterações mecânicas e químicas. Contudo, a concentração de K, Th e U nos solos e lateritos *in situ* possui alguma relação com a química da rocha em subsuperfície (Vasconcellos *et al.*, 1994).

Sendo assim, as unidades radiométricas não representam os verdadeiros limites das unidades litológicas, devido à dispersão dos radioelementos no solo. Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), fatores como umidade, porosidade e drenagem, o deslocamento dos limites das unidades radiométricas, a partir da rocha fonte, pode ser superior a dois ou três quilômetros.

Porém, existem outros fatores que controlam as respostas dos raios gama, como a vegetação, que pode absorver o tório e o urânio, além do potássio.

Como já foi explicado anteriormente, a interpretação dos dados gamaespectrométricos tem por objetivo delimitar áreas com diferentes níveis de radioatividade do K, Th, U e do canal de contagem total, elaborando desse modo mapas de unidades radiométricas. Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), o canal de contagem total deve ser utilizado preferencialmente na separação das unidades radiométricas, enquanto que os canais K, Th e U devem ser utilizados para a identificação do tipo de rocha.

## 5. MATERIAIS

No desenvolvimento do trabalho, foram utilizados os seguintes materiais.

### 5.1. MAPAS TOPOGRÁFICOS

Na área da quadrícula Cerro Azul (escala 1:100.000) não há levantamento topográfico feito pelo IBGE. As cartas topográficas (em escala 1:50.000) obtidas foram feitas pelo convênio Departamento de Serviço Geográfico do Exército - Codepar (1970). São elas: folha Vila Branca (SG.22 -X-B-IV-1); folha Ribeira (SG.22 -X-B-IV-2); folha Cerro Azul (SG.22 -X-B-IV-3) e folha Tunas (SG.22 -X-B-IV-4).

### 5.2. PRODUTOS DE SENSORES REMOTOS

Os produtos de sensoriamento remoto utilizados neste trabalho são provenientes do satélite Landsat 5, que conta com o sensor TM (*Thematic Mapper*), operando em sete faixas espectrais. São duas cenas (cenas 220-77 de 14/09/1986, que corresponde a cerca de 60% da área de estudo, e 221-77 de 30/11/1994, que abrange cerca de 90% da área de estudo), que foram obtidas no INPE em formato digital (nas bandas 1,2,3,4,5 e 7).

### 5.3. DADOS GAMAESPECTROMÉTRICOS

Foram utilizados dados do levantamento aerogeofísico Serra do Mar Sul, gentilmente cedidos pela CPRM para fins científicos. O projeto Serra do Mar Sul foi contratado pelo DNPM e executado pela empresa Geofoto em 1978, e apresenta as seguintes características técnicas:

- Levantamento de dados magnéticos utilizando magnetômetro de precessão nuclear, modelo G-803, fabricado pela Geometrics;
- Levantamento gamaespectrométrico utilizando gamaespectrômetro Exploranium DIGRS-3001 com volume de cristal de 1017.87 pol<sup>3</sup>;
- direção das linhas de vôo: N30W;
- espaçamento entre linhas de vôo: 1,0 km;
- Direção das linhas de controle: N60E;
- Espaçamento entre as linhas de controle: 20 km;
- Altura média de vôo: 150m;
- Navegação: controle visual;
- Recuperação dos vôos: recuperação com base no filme de rastreo;
- Aeronave: Islander.

## DESCRIÇÃO DOS DADOS DO PROJETO "BRAZIL AIRBORNE RADIOMETRIC MAPPING PROJECT - BARMP"

Este projeto organizou um banco de dados com dados de vários levantamentos aerogamaespectrométricos da CPRM (inclusive do projeto Serra do Mar Sul) e fez a conversão dos dados de cps para %K, ppm U e ppm Th, além de proceder correção de ruídos (*spikes*) e micronivelamento.

A remoção de "*spikes*" foi feita pelo BARMP utilizando um filtro de remoção de ruídos. Segundo CPRM-BARMP (1997), os perfis de dados foram filtrados utilizando-se um filtro passa-baixa não linear Naudy com uma distância de amostragem de 1/2 comprimento de onda. Em seguida, os dados foram filtrados utilizando um filtro de suavização 5 x 5 com os seguintes coeficientes: 0.1107, 0.2215, 0.3356, 0.2215, 0.1107.

O micronivelamento consiste na retirada de ruídos provenientes do tipo de amostragem que é feita nos aerolevantamentos. Essa amostragem é caracterizada por ter uma densidade maior na direção das linhas de vôo do que entre linhas de vôo. Ao serem interpolados em grades os dados apresentam ruídos paralelos à linha de vôo, ou seja, um comprimento de onda longo ao longo das linhas de vôo e um comprimento de onda curto perpendicular às linhas de vôo.

Segundo CPRM-BARMP (1997) os dados após a remoção dos "*spikes*" foram interpolados em grade utilizando-se o algoritmo de ajuste à mínima curvatura (GIPSI Rangrid, pacote de programas PGW) com uma célula igual a 1/4 da distância entre linhas de vôo. Segundo CPRM-BARMP (1997) o primeiro passo no micronivelamento consiste na aplicação de dois filtros de Fourier na grade: um cosseno ao quadrado direcional e um filtro passa alta de Butterworth. O efeito destes filtros é de deixar passar apenas aqueles elementos que são estreitos (comprimento de onda curto) na direção perpendicular às linhas de vôo. São extraídos valores a partir desta grade filtrada para compor um novo canal que contém o ruído da linha de vôo mais algum sinal geológico. Este canal é então filtrado com um filtro de passa baixa Naudy de comprimento de onda longo para separar o ruído da linha de vôo do comprimento de onda mais curto dos elementos geológicos. O limiar do comprimento de onda do filtro de grade passa alta é definido para ser muitas vezes maior do que o limiar do comprimento de onda do filtro passa alta que foi previamente aplicado, de modo que o canal de ruído contém somente elementos de "*stripe*", que são consideravelmente mais longos na direção da linha de vôo do que na direção perpendicular. Subtraindo este canal de ruído filtrado dos dados originais elimina-se o ruído das linhas de vôo obtendo-se os dados micronivelados.

A partir dos dados micronivelados, o projeto BARMP aplicou padrões de conversão dos dados gamaespectrométricos de cps para ppm. A conversão foi feita a partir de parâmetros de conversão levantados em campo.

Os dados para cada levantamento estão na forma de um radioelemento por arquivo ASCII, a estrutura de cada arquivo é a seguinte:

Canal	Dado
1	Leste (Projeção Equatorial de Mercator)
2	Norte (Projeção Equatorial de Mercator)
3	Contagem do radioelemento
4	Leste (Projeção Universal Transversa de Mercator)
5	Norte(Projeção Universal Transversa de Mercator)
6	Contagem do radioelemento nivelada
7	Concentração do radioelemento

#### 5.4. DADOS DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado em outubro de 1999. Foram visitados vários afloramentos na área de estudo, para correlação dos domínios gamaespectrométricos interpretados com as unidades geológicas. Também foram utilizados os pontos de campo de campanhas anteriores do prof. Dr. Ginaldo A. da Cruz Campanha.

Uma descrição simplificada dos pontos de campo e suas coordenadas encontram-se no Anexo 1.

## 6. METODOLOGIA

### 6.1. PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TM-LANDSAT 5

Para o pré-processamento das imagens TM-Landsat 5, foi utilizado o sistema PCI.

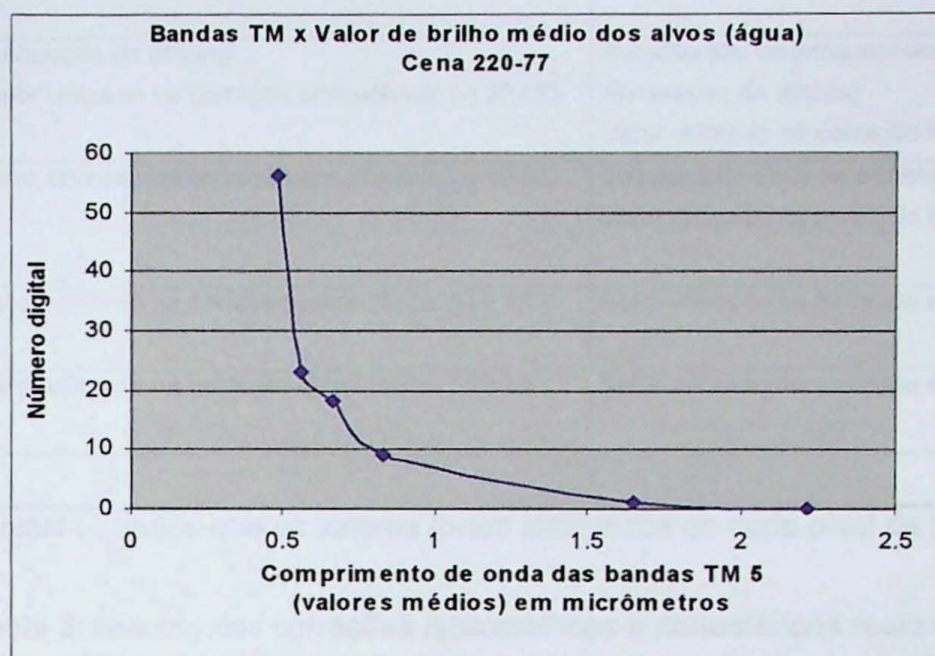
#### 6.1.1. Correção Radiométrica

Este tipo de correção nas imagens TM foi realizada com o objetivo de se atenuar os ruídos de varredura (striping) e preencher as linhas com ausência de informação presentes na imagem. Para o preenchimento de linhas sem informação, foi utilizado o programa LRP (*Line Replacement*), do sistema PCI. Este programa exige a identificação das linhas a serem substituídas e o método a ser utilizado na substituição (aqui foi utilizado a substituição da linha sem informação pela média dos pixels das linhas anterior e posterior).

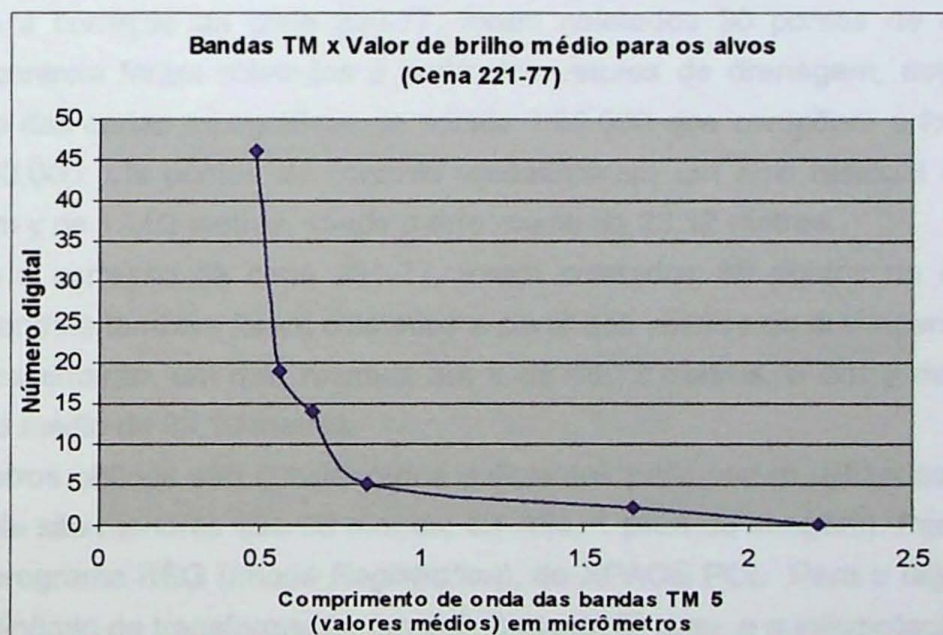
Para a eliminação dos ruídos de varredura, foi utilizado o programa DSTRIPE, do PCI.

#### 6.1.2. Correção Atmosférica

Para a correção atmosférica das imagens TM, foi coletado em cada banda alguns valores de brilho sobre os alvos escolhidos (foram coletadas amostras sobre o Rio Ribeira e em alguns lagos presentes nas imagens), pois os gráficos valor de brilho x bandas do TM dos alvos, para as cenas 220-77 e 221-77, apresentaram forma assintótica, com uma tendência de decréscimo do valor de brilho em função do aumento do comprimento de onda. O valor utilizado para a correção atmosférica foi o resultado da média dos valores de brilho dos alvos selecionados para cada banda. Esses valores foram subtraído para cada banda, pelo programa ARI (*Arithmetic Operations*), do PCI. As figuras 13 e 14 apresentam o gráfico do valor médio para os alvos selecionados pelo comprimento de onda médio das bandas do TM.



**Figura 13:** Gráfico do valor de brilho médio para os alvos selecionados pelo comprimento de onda das 6 bandas TM – cena 220-77



**Figura 14:** Gráfico do valor de brilho médio para os alvos selecionados pelo comprimento de onda das 6 bandas TM – cena 221-77

A tabela 3 apresenta um resumo das correções radiométricas e atmosféricas realizadas nas imagens.

	Cena 220-77	Cena 221-77
<b>Banda 1</b>	Atenuação do <i>striping</i> Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 56 ND *	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 46 ND
<b>Banda 2</b>	Atenuação do <i>striping</i> Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 23 ND	Substituição de linha ausente Atenuação do <i>striping</i> Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 19 ND
<b>Banda 3</b>	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 19 ND	Substituição de linha ausente Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 14 ND
<b>Banda 4</b>	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 9 ND	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 5 ND
<b>Banda 5</b>	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 1 ND	Valor utilizado na correção atmosférica: (-) 2 ND
<b>Banda 7</b>		

\* - O sinal (-) indica que os valores foram subtraídos de cada pixel da banda.

**Tabela 3:** resumo das correções radiométricas e atmosféricas realizadas.

### 6.1.3. Correção Geométrica

Para a correção atmosférica das imagens, foi utilizado o programa GCP Works, do sistema PCI.

Para a correção da cena 220-77, foram coletados 30 pontos de controle. Esses pontos de controle foram coletados a partir dos vetores de drenagem, estes oriundos da digitalização das cartas topográficas de escala 1:50.000 que compõem a folha Cerro Azul, escala 1:100.000. Os pontos de controle apresentaram um erro residual em x de 18,76 metros, e em y de 13,52 metros, sendo o erro médio de 23,12 metros.

Para a correção da cena 221-77, foram coletados 36 pontos de controle. Esses pontos de controle também foram coletados a partir dos vetores de drenagem. Os pontos de controle apresentaram um erro residual em x de 19,72 metros, e em y de 21,40 metros, sendo o erro médio de 29,10 metros.

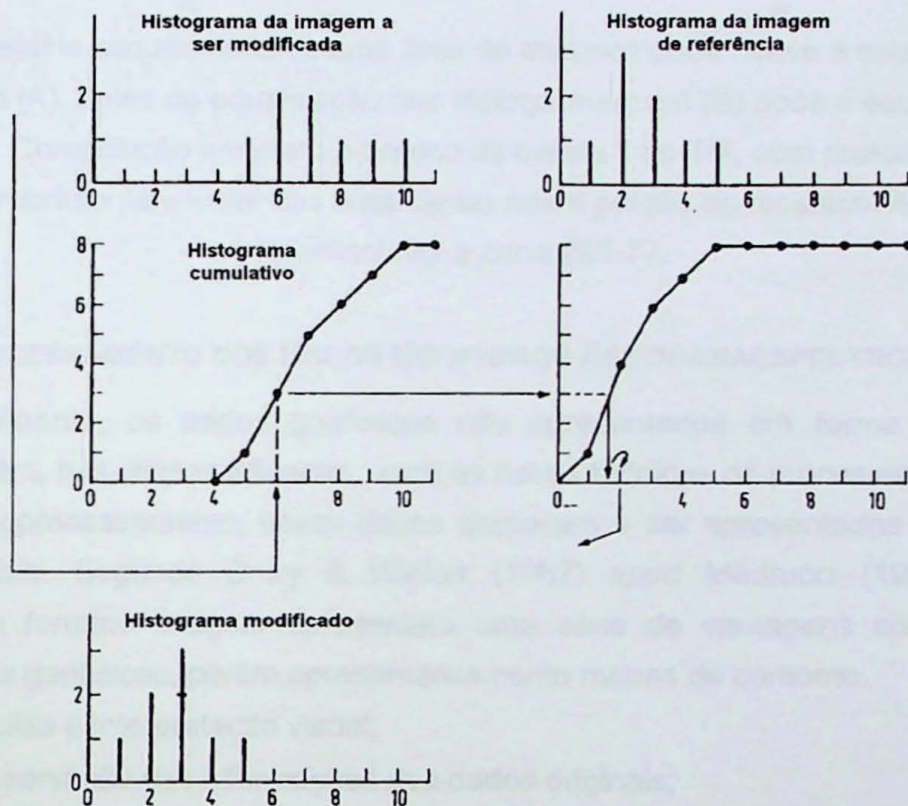
Os erros obtidos são considerados suficientes para serem utilizados no registro da imagem (pois são menores que 30 metros, ou seja, 1 pixel da imagem). Para o registro, foi utilizado o programa REG (*Image Registration*), do XPACE PCI. Para o registro, escolheu-se como polinômio de transformação um polinômio de 3º grau, e a interpolação por alocação do vizinho mais próximo para a reamostragem. Foi escolhido a reamostragem por vizinho mais próximo para não haver perda de informações, especialmente de feições de alta frequência.

### 6.1.4. Elaboração do Mosaico

Para a elaboração de um mosaico juntando duas imagens contíguas, normalmente é necessário a equalização dos histogramas (em inglês, *histogram matching*), para que o

histograma de uma imagem se torne parecido com o outro histograma, com a finalidade de tornar a distribuição dos valores de brilho parecidas nas duas imagens (Richards, 1993). Ou seja, a equalização dos histogramas minimiza as variações dos valores de brilho de uma imagem para a outra, antes da realização do mosaico.

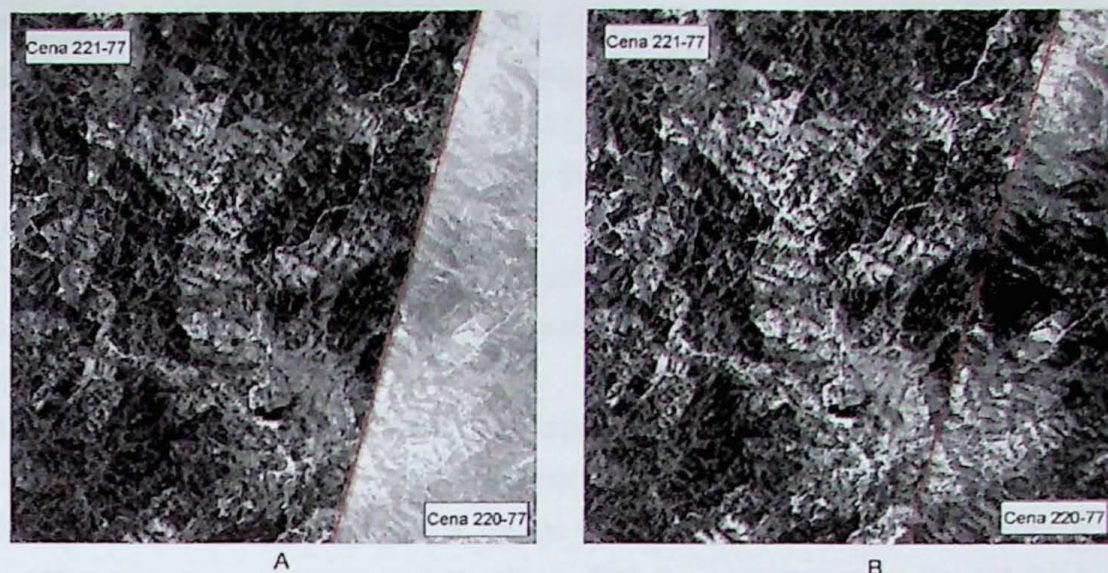
A figura 15 ilustra os passos para a equalização do histograma de uma imagem em relação a outra. Para este procedimento, é utilizado o histograma cumulativo da imagem a ser modificada para obter os novos valores de brilho. A equalização é feita pela leitura dos valores das ordenadas correspondentes aos valores de brilho originais (do histograma da imagem a ser modificada) a partir da abscissa. Os novos valores entram na ordenada do histograma cumulativo da imagem de referência, e os valores finais de brilhos são lidos na abscissa.



**Figura 15:** Ilustração dos passos para a equalização de histogramas  
(Fonte: Richards, 1993)

Normalmente, a imagem de referência é aquela que apresenta menor influência atmosférica (sem nuvens) e/ou a que abrange a maior área no mosaico.

A equalização dos histogramas e a mosaicagem foram feitas com o auxílio do programa MOSAIC, do PCI. A equalização dos histogramas foram feitas de maneira visual, visando gerar uma imagem na qual as variações de brilhos fosse o menor possível (ver figura 16).



**Figura 16:** detalhe esquemático de uma área do mosaico onde houve a colagem das duas cenas – em (A), antes da equalização dos histogramas; em (B) após a equalização dos histogramas. Composição em preto e branco da banda 1 do TM, com realce linear. A linha vermelha representa o limite das duas cenas nesta porção do mosaico. A imagem de referência foi a cena 221-77.

## 6.2. PRÉ-PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS AEROGAMAESPECTROMÉTRICOS

Normalmente, os dados geofísicos são apresentados em forma de mapas de contorno. Porém, nas últimas décadas, com as novas técnicas de processamento digital de imagens e geoprocessamento, esses dados passaram a ser apresentados em formato de imagens digitais. Segundo Drury & Walker (1987) *apud* Madrucci (1999), os dados geofísicos em formato imagem apresentam uma série de vantagens com relação aos mesmos dados geofísicos, porém apresentados como mapas de contorno:

- Facilita a interpretação visual;
- Preservação das informações dos dados originais;
- Possibilidade de integração das imagens geofísicas com outras imagens, como as imagens Spot e as imagens Landsat TM.

Como os dados aerogeofísicos são coletados ao longo de linhas paralelas, há a necessidade de se transformar esses dados numa malha regular (grade, ou mais comumente, *grid*). Esta transformação é feita através da utilização de interpoladores (curvatura mínima, krigagem, etc.). A escolha do tipo do interpolador e do tamanho da célula irão depender das características dos dados geofísicos originais utilizados.

Neste trabalho, a etapa de pré-processamento desenvolveu-se em três etapas: conversão dos dados originais em grades regulares, geração das imagens gama e reamostragem das células para 30 m. Para o pré-processamento dos dados de aerogamaespectrometria, foi utilizado o programa Geosoft Oasis Montaj.

Como já foi explicado, os dados foram convertidos de cps para ppm (e % para K) pelo projeto BARMP (CPRM-BARMP, 1997), além de outras correções realizadas.

Primeiramente, os dados do projeto Serra do Mar Sul (em formato digital) foram recortados de acordo com os limites da quadrícula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV), utilizando-se os comandos CREATE RECTANGULAR MASK e WINDOW X,Y TO POLYGON MASK. Depois, foi elaborado um mapa contendo as linhas de vôo, utilizando-se o comando LINE PATH (ver Anexo 2).

O interpolador utilizado foi o de curvatura mínima, que gera uma superfície suavizada, com os valores mais próximos possíveis dos dados originais (Kecler, 1994 *apud* Parro, 1998).

Após alguns testes com células de tamanhos menores, utilizou-se o tamanho da célula para interpolação de 780 metros. Apesar de Vasconcellos *et al.* (1994) estabelecer a dimensão das células como entre 1/4 e 1/8 do espaçamento das linhas de vôo (que, neste levantamento, é de 1 km), optou-se por utilizar 780 m como tamanho da célula devido aos desvios das linhas de vôo do projeto Serra do Mar Sul. Estes desvios causam “vazios” na grade interpolada, pois optou-se por utilizar distância de busca nula. Utilizou-se distância de busca nula com a intenção de se manter a fidelidade aos dados originais.

Após a interpolação (realizada com o comando GRIDDING), as grades foram reamostradas para 30 m, utilizando-se o interpolador Akima. A reamostragem para células de 30 metros é realizada para que seja possível a integração das imagens geofísicas com as imagens TM-Landsat 5. A escolha do interpolador Akima foi feita após alguns testes com os interpoladores disponíveis, sendo que o interpolador Akima produziu os melhores resultados em menor tempo.

Os diferentes canais (contagem total, potássio, tório, urânio) foram interpolados e reamostrados para 30 metros separadamente. Foi gerada uma imagem para o canal da contagem total, para o canal do potássio, para o tório e para o canal de urânio. Além dessas imagens, foram feitas as imagens para as razões Th/K, U/K e Th/U.

### 6.3. INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLÓGICA

O processo fotointerpretativo se desenvolveu a partir dos trabalhos de Guy (1966) *apud* Soares & Fiori (1976) e Riverau (1970) *apud* Soares & Fiori (1976), sendo mais recentemente adaptado para produtos de sensores remotos por Veneziani & Anjos (1982) *apud* Santos (1986). O método fundamenta-se em uma seqüência de etapas lógicas e sistemáticas em que são analisadas as propriedades texturais do relevo e drenagem, definindo zonas com as mesmas propriedades (zonas homólogas), às quais são associados significados geológicos. O método é dividido em três etapas:

**Fotoleitura** – onde é feita a identificação dos elementos texturais de relevo e drenagem.

**Fotoanálise** – onde são analisadas as propriedades texturais da rede de drenagem e relevo (alinhamentos, lineações, angularidade, assimetria e uniformidade) e feita a caracterização das formas segundo estas propriedades, ou seja, a definição de zonas homólogas (com mesmas propriedades).

**Fotointerpretação** – onde os dados analisados são associados a significados geológicos, à luz do atual conhecimento sobre a área.

#### 6.4. INTEGRAÇÃO DIGITAL DOS DADOS

A integração das imagens gamaespectrométricas e TM-Landsat 5, neste trabalho, foi realizada da seguinte maneira:

- a) conversão das imagens gama e TM-Landsat 5 para um único programa;
- b) integração das imagens gama e TM-Landsat 5 através do método *pseudocolor colordrape*;
- c) aplicação de técnicas de realce de imagens nas imagens TM-Landsat 5 e gama, visando gerar um produto final de fácil interpretação visual.

O programa escolhido para a integração digital dos dados foi o ER Mapper (versão 5.5), devido à simplicidade e flexibilidade das ferramentas de integração digital de dados.

##### 6.4.1. Método *Pseudocolor colordrape*

A integração de dados pelo método *pseudocolor colordrape* é o mais simples de todos os métodos de integração digital de dados. Normalmente é usado para mostrar duas variáveis: uma na cor, e outra na intensidade.

Segundo Lillesand & Kiefer (1994), o olho humano possui dois tipos de receptores de luz. Há aqueles equivalentes a um filme pancromático, conhecidos como **bastões** por causa de suas formas. Os bastões não conseguem discernir cores, e respondem somente ao brilho. Os **cones** contêm três tipos diferentes de pigmentos, sensíveis a luz vermelha, verde e azul. Isto significa que podemos utilizar as cores para representar um tipo de dado, e a intensidade de luz (brilho) para representar outro tipo de dado – sobre a mesma área – simultaneamente. Por exemplo, pode-se mostrar os dados de risco a incêndio em cores sobre uma foto aérea monocromática, apresentada como intensidade. Isto torna fácil a observação das rodovias que levam às áreas de alto risco de incêndio (ER Mapper, 1995).

Como os bastões são mais sensíveis a pequenas mudanças que os cones, a informação de alta variabilidade (ou seja, a informação de alta frequência) deve ser mostrada como intensidade, enquanto as informações de baixa frequência devem ser mostradas como pseudo-cor.

Para criar uma imagem através do método *pseudocolor colordrape*, a técnica normalmente utilizada é a de clarificar (saturar) os dados para mostrá-los como camadas separadas, e depois combinar as camadas (ER Mapper, 1995).

A utilização da técnica de pseudo-cores é utilizada para se obter uma “versão” colorida de uma imagem preto e branco (Richards, 1993), onde os valores numéricos da imagem não são modificados. A transformação por pseudo-cores associa cada nível de cinza a uma cor. As cores utilizadas variam conforme a tabela de pseudo-cores empregada.

As tabelas de pseudo-cores comuns variam de vermelho (utilizado para os altos valores) até azul (utilizado para representar os menores valores).

Neste trabalho, o objetivo é integrar as informações da composição das rochas contidas nas imagens gamaespectrométricas com as informações texturais de relevo contidas nas imagens TM-Landsat 5. Por isso, as imagens gama são representadas como pseudo-cores, e as imagens TM, como intensidade.

#### 6.4.2. Geração dos Produtos Integrados

A integração das imagens gamaespectrométricas (CT, K, Th, U, U/Th, U/K, Th/K e parâmetro F) e TM-Landsat 5 foi feita da seguinte maneira:

- a) Geração da 1ª Componente Principal (CP 1) da imagem TM, realçando-a linearmente;
- b) Saturação da 1ª CP, já realçada, com um valor constante (acrescentando 20 NDs<sup>1</sup>);
- c) Realce por aumento linear de contraste de todas as imagens gamaespectrométricas, e a aplicação de uma tabela de pseudo-cores (neste trabalho, foi escolhida a tabela de pseudo-cores *Contour*, do ER Mapper);
- d) Integração, pelo método *pseudocolor colordrape*, com a 1ª CP no canal Intensidade, e uma imagem gamaespectrométrica no canal pseudo-cor.

Como produto final, temos 8 imagens, resultantes da integração de cada imagem gama gerada com a 1ª CP da imagem TM.

---

<sup>1</sup> Números digitais (ou níveis de cinza).

## 7. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

### 7.1. ATIVIDADES REALIZADAS

Para a execução deste trabalho, foi proposto uma série de atividades, descritas abaixo.

#### **1. Pesquisa bibliográfica sobre a utilização dos produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísica no mapeamento geológico.**

Atividades: pesquisa de material bibliográfico com a descrição de métodos para a utilização dos produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísica no mapeamento geológico.

#### **2. Correção espectral e geográfica das imagens de sensoriamento remoto (cenas 220-77 de 1986, que corresponde a cerca de 60% da área de estudo, e 221-77 de 1994, que abrange cerca de 40% da área de estudo).**

Atividades: pré-processamento das duas cenas, sendo esta atividade subdividida em três itens: a) registro das duas imagens; b) correção espectral de uma das duas cenas e c) montagem de um mosaico contendo as duas cenas.

Produto: mosaico com as duas cenas de sensoriamento remoto, corrigidas espectralmente e geograficamente.

#### **3. Processamento digital das imagens de sensoriamento remoto.**

Atividades: processamento digital da imagem Landsat, gerando composições que mais favoreçam a interpretação geológica, utilizando-se de ferramentas como: transformação por principais componentes, filtros direcionais, elaboração de composições coloridas, etc.

Produto: imagem de sensoriamento remoto processada, com realce nos dados estruturais e contatos litológicos.

#### **4. Análise e tratamento dos dados aerogeofísicos de gamaespectrometria.**

Atividades: mapas já prontos de contagem total e de canais e preparação de outros (como mapas de razão Th/U, U/K, etc.), na busca de padrões correlatos a geologia

Produtos: mapas temáticos de geofísica, em formato raster.

#### **5. Integração dos dados de sensoriamento remoto e dados geofísicos gamaespectrométricos tratados.**

Atividades: integração do mosaico das imagens de sensoriamento remoto e dos mapas geofísicos, visando a interpretação das mesmas e a separação em domínios correlacionáveis à geologia.

Produto: mapa geológico derivado da interpretação da imagem de sensoriamento remoto e dos mapas geofísicos.

#### **6. Comparação entre o mapa obtido na interpretação das imagens de sensoriamento remoto e geofísica com o mapa geológico.**

Atividades: sobreposição dos vetores dos dois mapas e comparação dos resultados, com eventual checagem em campo para a definição e correção dos contatos geológicos.

Produto: mapa geológico com os contatos geológicos corrigidos

### 7. Redação, edição e impressão do relatório final.

Atividades: organização das informações obtidas durante a execução do projeto, edição de imagens para apresentação, impressão de mapas e redação e impressão do relatório final.

Produto: relatório final e mapas impressos.

## 7.2. CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

Para o andamento destas atividades foi proposto o seguinte cronograma, considerando o período de 9 (nove) meses para a realização do projeto.

Atividades	Meses								
	1 Mar /99	2	3	4	5	6	7	8	9 Nov/99
Pesquisa bibliográfica sobre a utilização dos produtos de sensoriamento remoto e aerogeofísica em mapeamento geológico	■	■	■						
Correção espectral e geográfica das imagens de sensoriamento remoto		■	■						
Análise e tratamento dos dados aerogeofísicos e integração dos dados			■	■	■				
Interpretação das imagens de sensoriamento remoto e dos mapas geofísicos				■	■				
Comparação entre o mapa obtido na interpretação das imagens de sensoriamento remoto e geofísica com o mapa geológico.					■	■	■		
Impressão de mapas finais e redação do relatório final								■	■
Edição do relatório final									■

## 7.3. DIFICULDADES SURGIDAS

A principal dificuldade surgida foi a indefinição do programa de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto a ser utilizado. Iniciou-se o trabalho utilizando-se o sistema ER Mapper, devido a simplicidade na sua utilização e a familiarização do aluno com o sistema. Porém, durante a realização dos trabalhos, notou-se a falta de algumas ferramentas no ER Mapper, especialmente para a execução das correções radiométricas (para a substituição de linhas sem informação). Além disso, a ferramenta de atenuação de ruídos de varredura (*striping*) não se mostrou eficiente. Por estes motivos, decidiu-se utilizar o sistema PCI, o que exigiu um treinamento extra do aluno.

Outra dificuldade foi a integração das imagens gamaespectrométricas com as imagens TM-Landsat 5 no PCI. O programa Geosoft Oasis Montaj exporta as imagens gamaespectrométricas para o formato PCI (.pix), porém estes dados estão no formato de 32 bits. A solução encontrada foi exportar as imagens TM para o ER Mapper, e realizar a integração das imagens gama e TM no ER Mapper.

## 8. RESULTADOS

### 8.1. TRABALHO DE CAMPO

Com os produtos integrados já prontos, foi feita uma comparação entre esses produtos e o mapa geológico da área, para uma primeira correlação e interpretação das diferentes respostas gamaespectrométricas e dos domínios texturais com as unidades lito-estruturais da área. Com base nessas correlações, foram definidas áreas-alvo para a checagem em campo. As áreas-alvo foram aquelas áreas cujas respostas gamaespectrométricas não eram correlacionáveis com a litologia indicada pelo mapa geológico. Por isso, o trabalho de campo não cobriu toda a área, mas algumas porções desta.

Basicamente, o trabalho de campo foi realizado sobre algumas porções do Complexo Granítico Três Córregos, pois este apresenta áreas com alta resposta gamaespectrométrica, enquanto outras áreas aparecem com baixa resposta gamaespectrométrica. A checagem de campo foi realizada com a intenção de verificar motivo dessas respostas anômalas.

Os pontos de campo e uma breve descrição litológica se encontram no Anexo 1 – Pontos de Campo.

#### **Rochas e Suítes Alcalinas**

Foram visitados alguns pontos onde afloram rochas alcalinas ou geneticamente relacionada a esses eventos. No ponto 18 encontrou-se uma rocha fanerítica média, de cor esverdeada, provavelmente uma rocha ultrabásica da suíte alcalina de Itapirapuã.

Nas proximidades do corpo alcalino de Mato Preto, foram observados diques de rochas básicas-ultrabásicas, lamprófiros e inúmeros veios de fluorita cortando granitos foliados (pontos C21, C22 e C23).

#### **Complexo Granítico Três Córregos**

Durante o trabalho de campo, observou-se que o Complexo Granítico Três Córregos pode ser dividido em duas unidades: os granitos e os gnaisses (ver figura 17).

Os granitos ocorrem mais freqüentemente na borda leste do Complexo Três Córregos. São, em geral, granitos de cor cinza alaranjada, com matriz de granulometria média, composta por quartzo, plagioclásio, anfibólio e biotita. Apresentam normalmente porfiroblastos de feldspato potássico de grande tamanho (chegam até a 5 centímetros de comprimento). A estrutura dessas rochas variam desde isotropas até milonitizadas. Porém, com o aumento do grau de milonitização, há a diminuição dos tamanhos dos porfiroblastos.

Os gnaisses ocorrem na borda oeste do Complexo Três Córregos: são de cor cinza clara, foliados ou migmatizados (mais freqüentemente), com granulometria média,

compostos por níveis quartzo-feldspáticos intercalados por níveis compostos por biotita e anfibólio.

Em meio a esses gnaisses, também são encontradas rochas metassedimentares, como quartzitos, filitos e rochas calciossilicáticas. Não foi observado quais são as relações



Gnaiss quartzo- feldspático  
Ponto C11



Granito porfiroblástico  
Ponto C16

Figura 17

entre o granito e os gnaisses.

### Faixa Itaiacoca

Foram feitos alguns pontos de campo nas proximidades do contato das litologias da Faixa Itaiacoca com o Complexo Granítico Três Córregos. Mais próximo desse contato geológico (inferido) têm-se filitos cinza escuros, bem laminados (pontos C32, C33, C34 e C36), com intercalações de siltitos (ponto C35) e arenitos finos (ponto C37). Um pouco mais afastado do contato com o Três Córregos, foi visitado um ponto de afloramento de mármore (ponto C33).

## Subgrupo Ribeira

Foi visitado um ponto de afloramento de rochas do Subgrupo Ribeira: o ponto C25, que corresponde a dolomitos cinza claros.

### 8.2. INTERPRETAÇÃO FOTOGEOLÓGICA DA IMAGEM TM (1ª COMPONENTE PRINCIPAL)

Neste trabalho, a interpretação fotogeológica da imagem 1ª Componente Principal se resume a extração de lineamentos.

Lineamento é uma feição linear mapeável, simples ou composta, contínua ou descontínua, da superfície terrestre, cujas partes estão alinhadas em um arranjo retilíneo ou suavemente curvo e que difere distintamente dos padrões de feições que lhe são adjacentes, refletindo um fenômeno de superfície (O'Leary *et al.*, 1976).

Os lineamentos estruturais foram obtidos através da delimitação dos alinhamentos de feições topográficas e das drenagens (figura 18).

Não foi realizada a delimitação das diferentes unidades texturais (neste trabalho, unidade textural é uma região que possui textura única e que a difere das regiões vizinhas). As informações texturas foram utilizadas nas fases seguintes para a delimitação das diferentes unidades gamaespectrométricas-texturais.

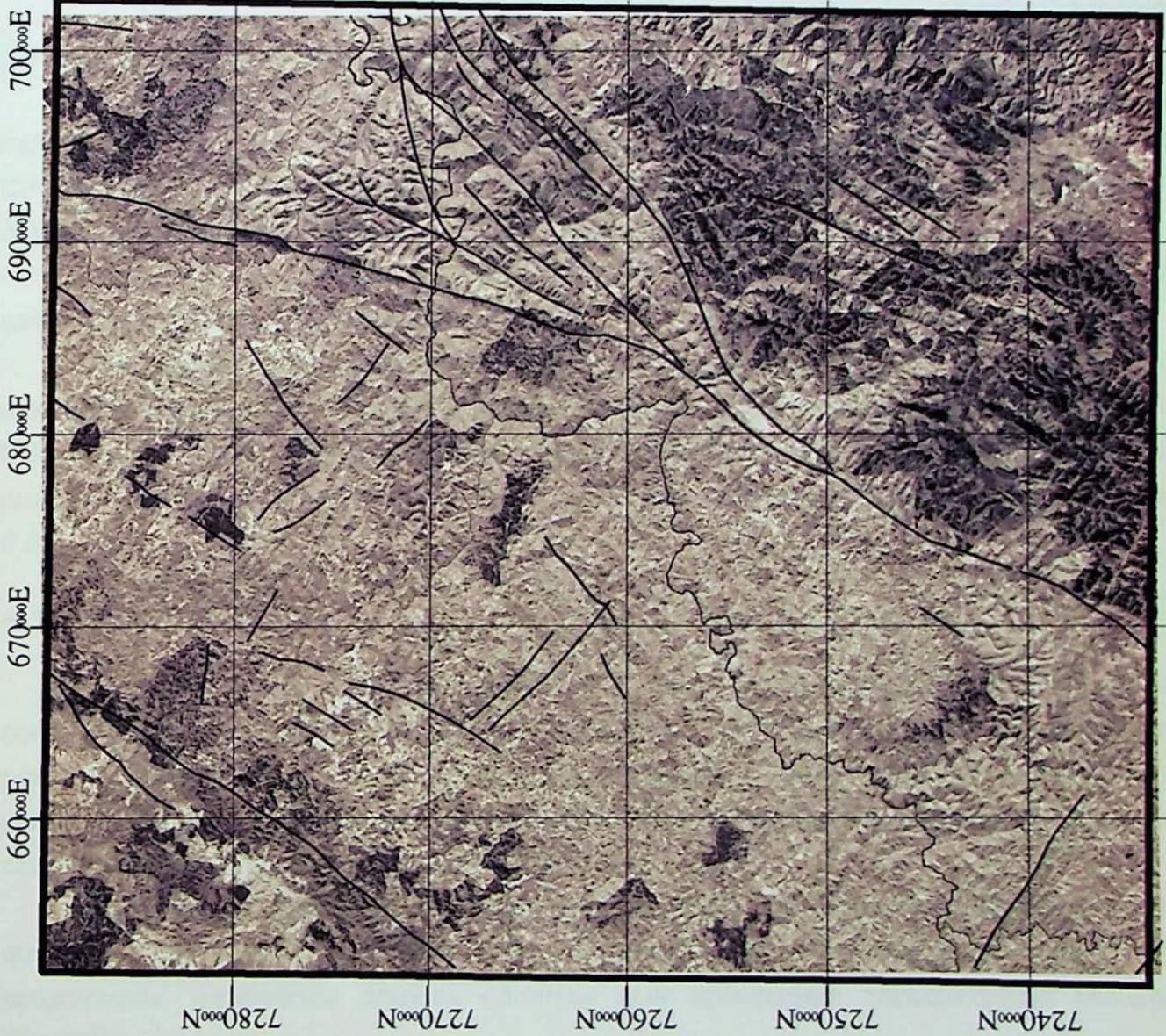
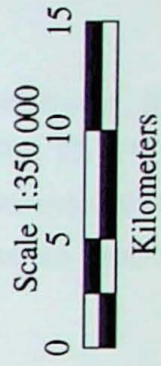
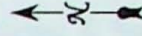
Figura 18 -  
Principal Componente 1 - TM  
e os principais lineamentos  
fotointerpretados

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

Legenda

~ Lineamentos fotointerpretados

□ Limites da quadricula



### 8.3. INTERPRETAÇÃO DOS PRODUTOS INTEGRADOS 1ª CP TM E GAMA

A metodologia utilizada para a interpretação dos produtos integrados 1ª CP e gama é composta por uma fase qualitativa e outra quantitativa. As etapas da interpretação, envolvidas em cada fase, serão descritas abaixo.

A metodologia aqui utilizada é derivada da metodologia utilizada por Parro (1998).

#### 8.3.1. Fase Qualitativa

Na caracterização qualitativa dos domínios gamaespectrométricos – texturais, foram utilizados os mapas integrados contagem total (CT) /1ª CP, K /1ª CP, U /1ª CP e Th /1ª CP.

A capacidade de discernimento visual das diferentes unidades é fundamental nesta fase. Em cada mapa, busca-se agrupar conjuntos de unidades que expressam respostas gamaespectrométricas e texturas semelhantes.

As etapas seguidas durante a interpretação qualitativa são:

1. Do produto integrado CT / 1ª CP foram extraído os grandes domínios gamaespectrométricos–texturais da área (figura 19).

2. Os domínios delimitados na 1ª etapa são comparados às unidades individualizadas nos produtos integrados K /1ª CP (figura 20), Th /1ª CP (figura 21) e U /1ª CP (figura 22). Desta forma, os grandes domínios gamaespectrométricos-texturais delimitados na 1ª etapa são desmembrados em subdomínios (figura 23).

Como produto final da fase qualitativa, temos um mapa de unidades gamaespectrométricas-texturais (figura 24).

Os produtos integrados (Th/K) / 1ª CP, (U/K) / 1ª CP e (U/Th) / 1ª CP e suas respectivas interpretações são apresentados nos anexos 3, 4 e 5, respectivamente. Não foi feita a interpretação e delimitação das unidades gamaespectrométricas-texturais nesses três produtos, mas eles foram utilizados como fontes de informações adicionais para a etapa 8.3.3.

#### 8.3.2. Fase Quantitativa

A fase quantitativa da interpretação dos domínios gamaespectrométricos-texturais consiste em se levantar todos os valores medidos dos canais individuais de contagem total, potássio, tório e urânio, que caracterizam cada domínio e subdomínio individualizado na interpretação qualitativa. Os valores das medidas gamaespectrométricas que caracterizam cada domínio e subdomínio estão na tabela 4.

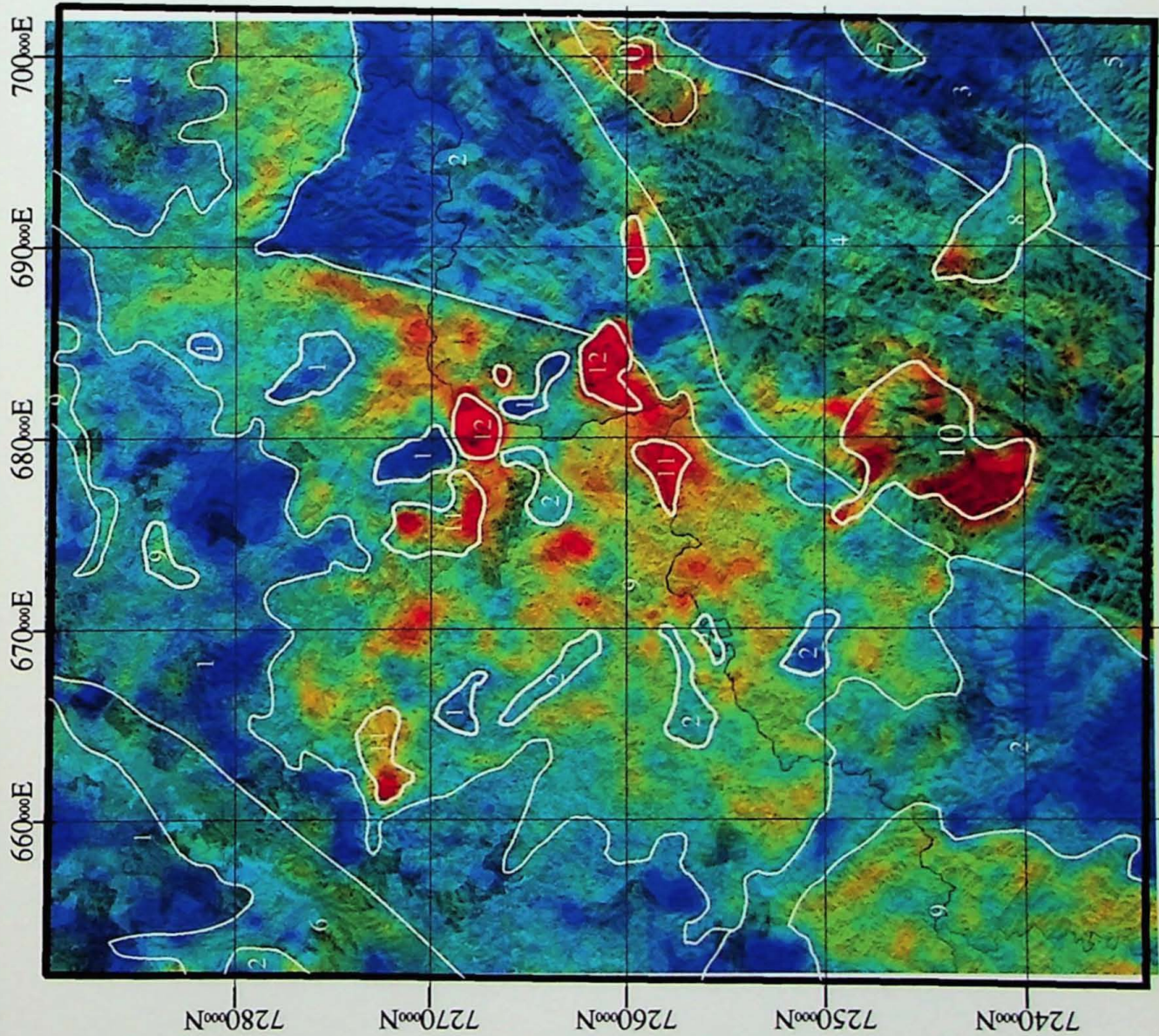
Esta etapa é importante pois verifica a validade das interpretações realizadas na fase qualitativa. Os domínios que apresentam respostas gamaespectrométricas similares são reagrupados, excetuando aqueles domínios que apresentam características texturais diferentes.

As denominações S, E e I fazem referência às unidades interpretadas como rochas sedimentares, embasamento e intrusões diversas. Geralmente, as menores respostas gamaespectrométricas são encontradas no domínio S. O domínio E apresenta um aumento nas respostas gamaespectrométricas, e normalmente as respostas gamaespectrométricas apresentadas pelo domínio I são as mais altas.

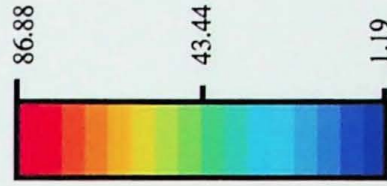
15238

# Figura 19 - Produto Integrado Contagem Total / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)



Legenda

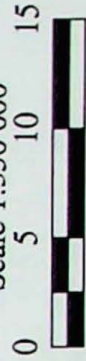


1  
Unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

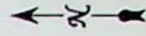
Contato entre as unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

Limites da quadricula

Scale 1:350 000

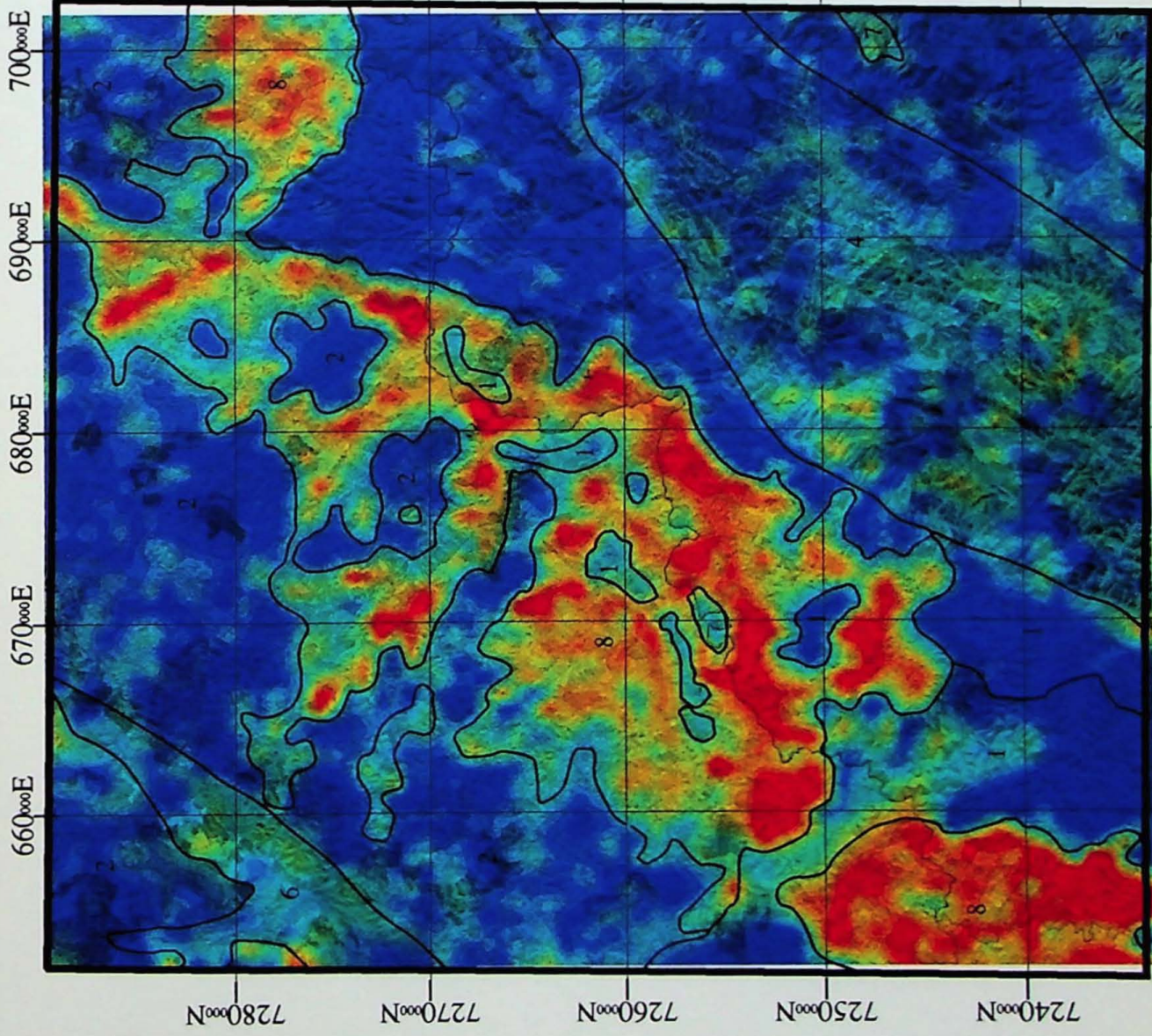


Kilometers

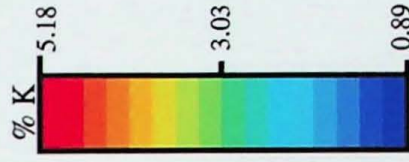


# Figura 20 - Produto Integrado Canal K / CP 1 - TM

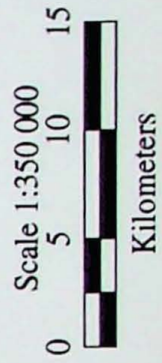
Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)



Legenda



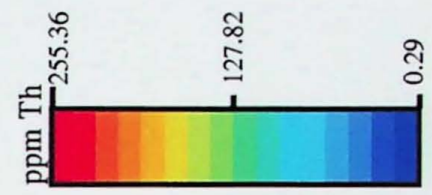
- 1 Unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas
- Contato entre as unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas
- Limites da quadricula



# Figura 21 - Produto Integrado Canal Th / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

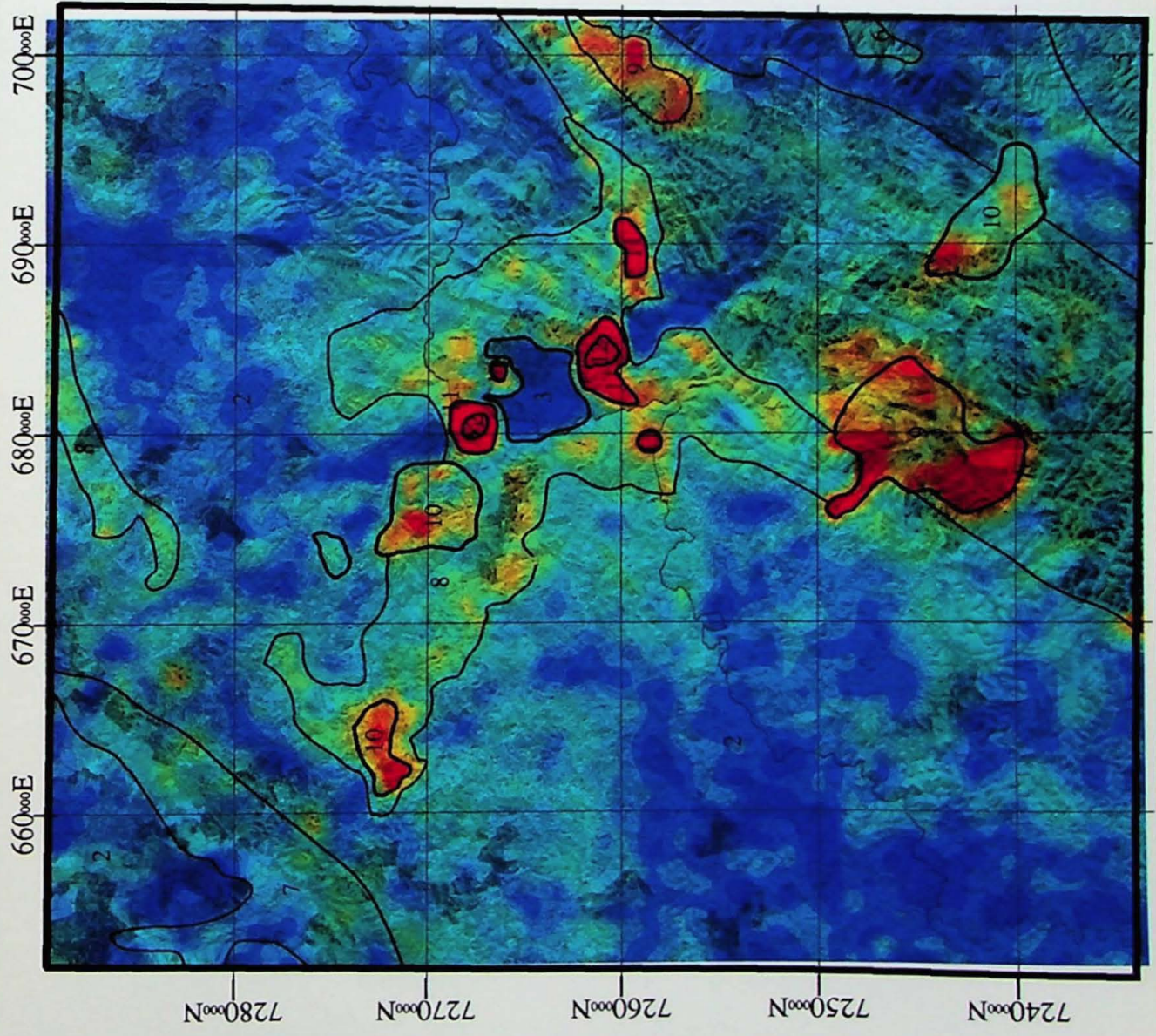
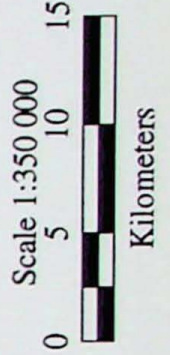
## Legenda



1 Unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

Contato entre as unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

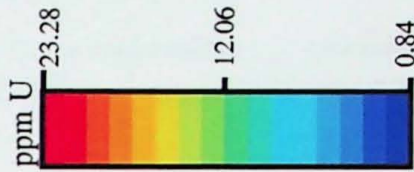
Limites da quadricula



# Figura 22 - Produto Integrado Canal U / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

Legenda



1 Unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

Contato entre as unidades gamaespectrometricas-texturais interpretadas

Limites da quadricula

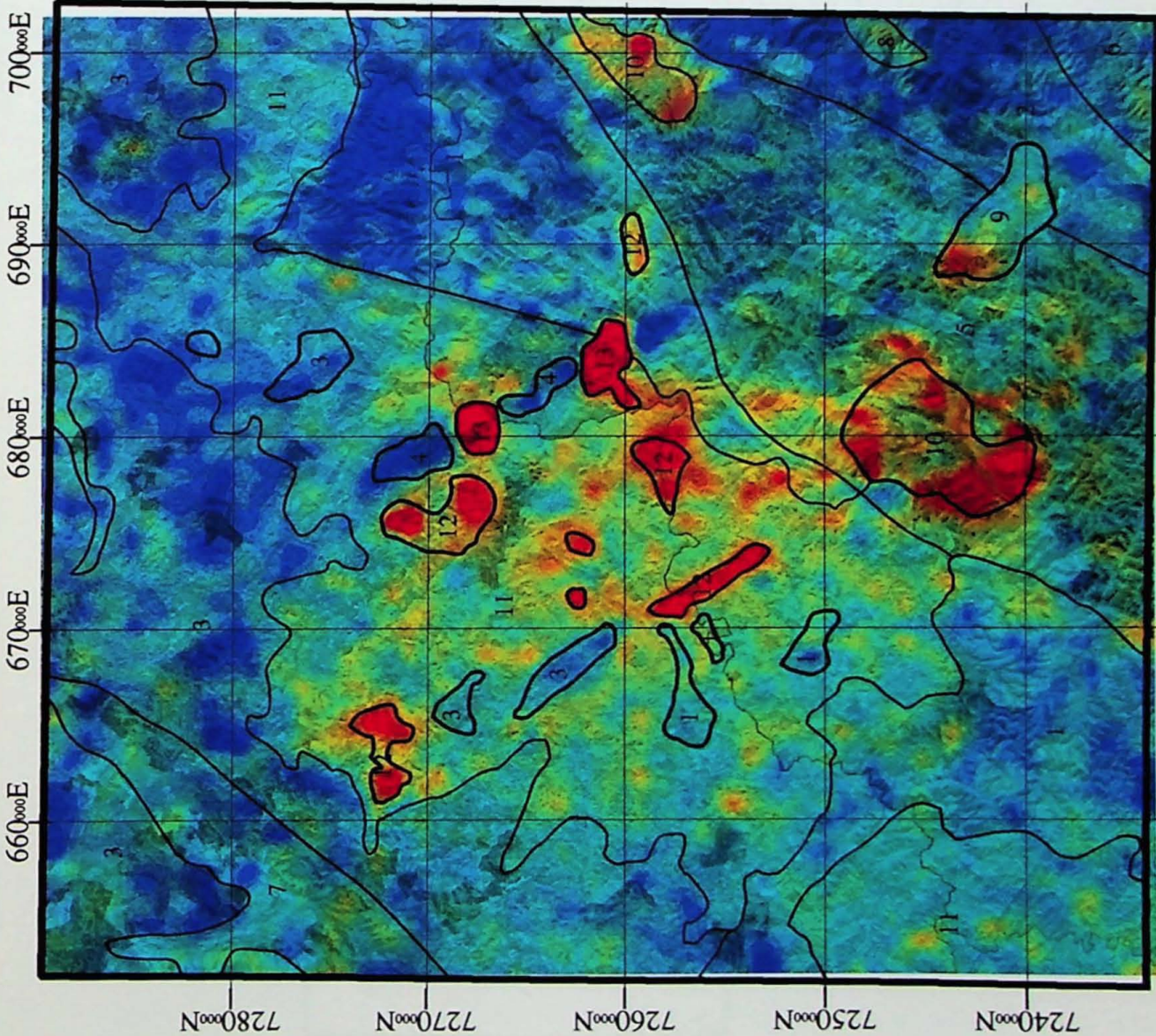
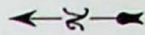
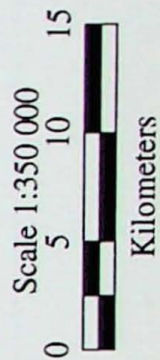
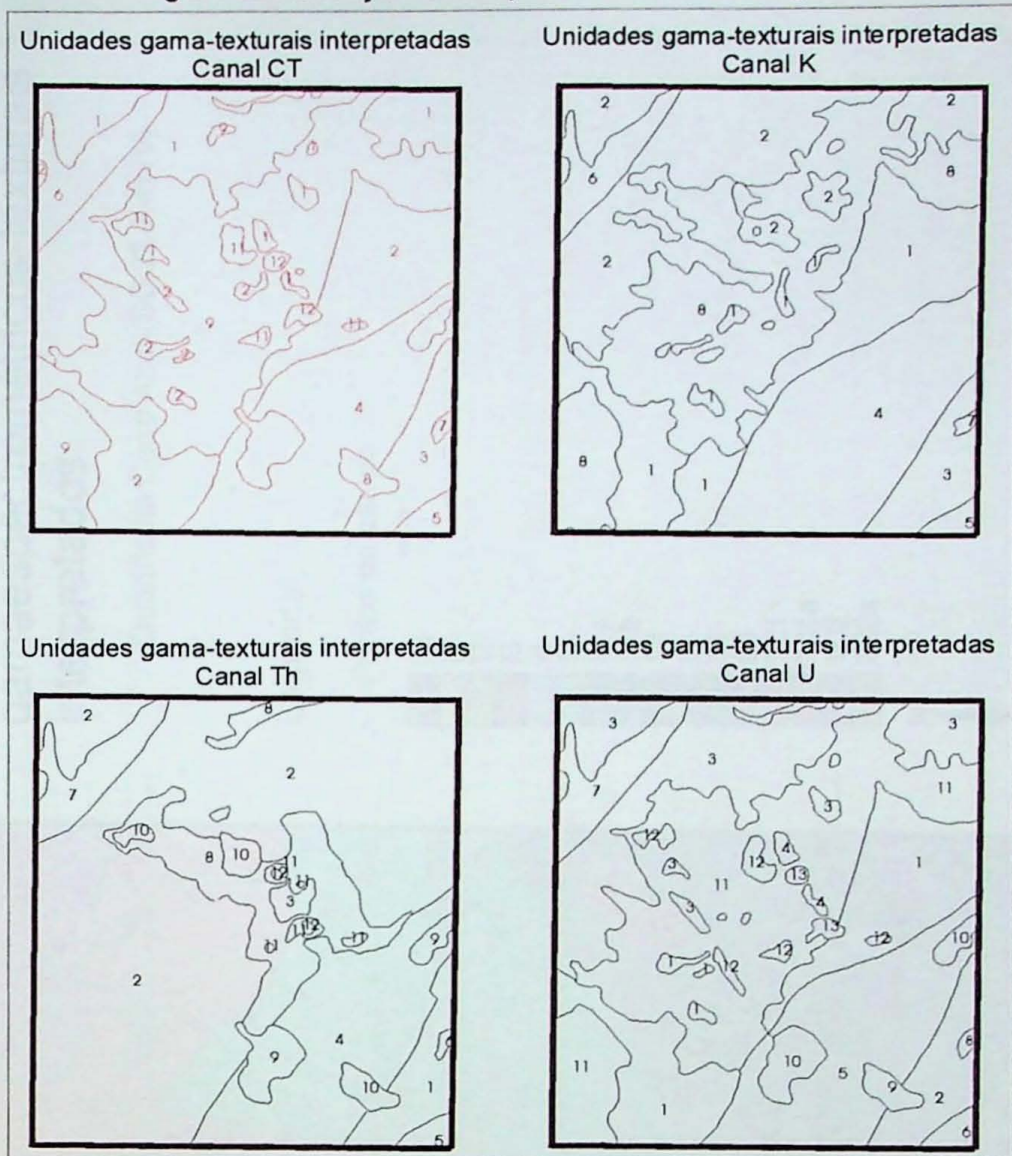
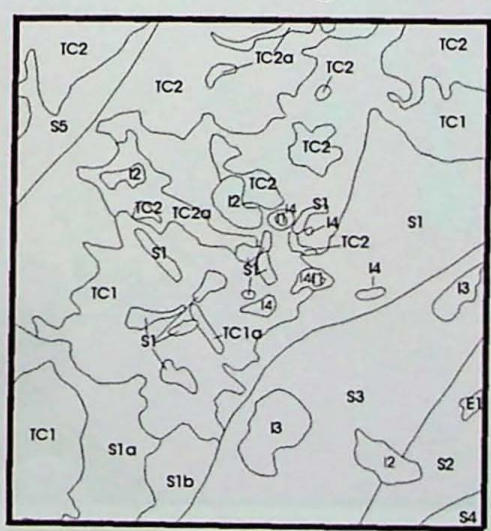


Figura 23: Geração do mapa de unidades integradas



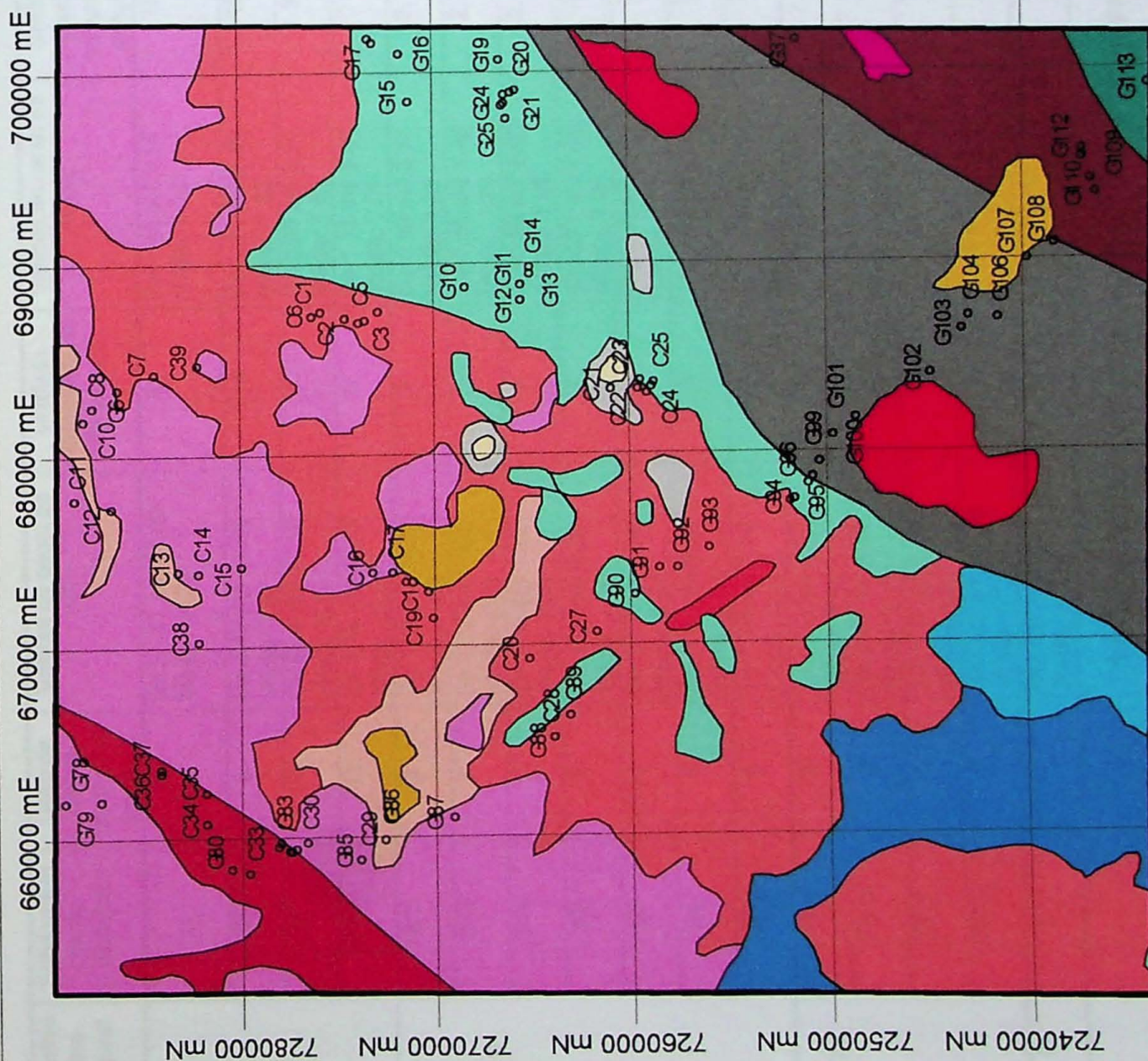
Sobreposição das diferentes interpretações

Unidades Integradas



**Figura 24 - Mapa de domínios  
gamaespectrométricos-texturais  
interpretados**

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)



**Legenda**

◦ Pontos de campo

- E1
- I1
- I2
- I3
- I4
- S1
- S1a
- S1b
- S2
- S3
- S4
- S5
- TC1
- TC1a
- TC2
- TC2a



Domínio gama-textural	Subdomínio gama-textural	Unidade Gama-textural canal CT	Valores do canal de CT	Unidade Gama-textural do canal K	Valores do canal de K (%)	Unidade Gama-textural canal Th	Valores do canal de Th (ppm)	Unidade Gama-textural do canal U	Valores do canal de U (ppm)
I	I1	12	De 21.41 até 86.00 Média: 44.21	8	De 1.49 até 5.19 Média: 3.13	12	De 86.52 até 256.78 Média: 184.11	13	De 10.22 até 23.30 Média: 17.73
	I2	8	De 3.47 até 11.94 Média: 7.37	2, 4	De 1.12 até 3.90 Média: 1.82	10	De 12.54 até 31.92 Média: 20.53	9	De 2.65 até 9.59 Média: 4.55
	I3	10	De 5.44 até 15.10 Média: 8.60	4	De 0.95 até 3.21 Média: 1.63	9	De 16.71 até 44.26 Média: 25.74	10	De 3.06 até 8.22 Média: 5.06
	I4	12	De 8.46 até 85.17 Média: 21.02	8	De 1.12 até 5.19 Média: 3.06	11	De 17.02 até 83.05 Média: 69.91	13	De 2.65 até 23.30 Média: 9.10
S	S1	2	De 1.19 até 14.31 Média: 4.69	1	De 0.89 até 3.46 Média: 1.28	2, 8	De 0.28 até 21.44 Média: 10.21	1	De 0.84 até 4.51 Média: 2.52
	S1a	2	De 1.19 até 14.31 Média: 4.69	1	De 0.89 até 3.46 Média: 1.28	2, 8	De 0.28 até 21.44 Média: 10.21	1	De 0.84 até 4.51 Média: 2.52
	S1b	2	De 1.19 até 14.31 Média: 4.69	1	De 0.89 até 3.46 Média: 1.28	2, 8	De 0.28 até 21.44 Média: 10.21	1	De 0.84 até 4.51 Média: 2.52
	S2	3	De 1.62 até 6.20 Média: 3.80	3	De 0.91 até 2.09 Média: 1.27	1	De 3.57 até 15.89 Média: 9.74	2	De 0.98 até 3.46 Média: 2.25
	S3	4	De 2.77 até 10.48 Média: 5.68	4	De 0.95 até 3.21 Média: 1.53	4	De 2.33 até 44.26 Média 15.60	5	De 1.36 até 8.46 Média: 3.46
	S4	5	De 4.18 até 6.48 Média: 5.03	5	De 0.98 até 2.16 Média: 1.60	5	De 10.07 até 14.76 Média: 12.40	6	De 2.05 até 3.79 Média: 2.79
	S5	6	De 1.76 até 7.40 Média: 5.44	6	De 1.03 até 2.82 Média: 1.85	7	De 5.66 até 17.65 Média: 12.34	6	De 1.70 até 4.22 Média: 2.97
	TC	TC1	9	De 4.23 até 9.97 Média: 6.82	8	De 1.12 até 4.70 Média: 3.06	2, 8	De 3.80 até 21.44 Média: 10.21	11
TC	TC1a	9	De 6.71 até 9.36 Média: 8.37	8	De 2.38 até 3.96 Média: 3.26	2	De 8.94 até 16.79 Média: 11.93	12	De 4.37 até 7.02 Média: 5.99
	TC2	1	De 1.36 até 8.66 Média: 4.63	2	De 0.95 até 2.30 Média: 1.29	2	De 1.46 até 21.44 Média: 10.21	3	De 1.26 até 4.51 Média: 2.46
	TC2a	9	De 3.23 até 11.06 Média: 6.13	2	De 0.95 até 2.30 Média: 1.29	8	De 7.40 até 31.92 Média: 16.31	3	De 1.75 até 6.74 Média: 3.73
E	E1	7	De 3.90 até 8.21 Média: 6.20	7	De 1.83 até 2.49 Média: 2.22	6	De 13.09 até 15.19 Média: 14.22	8	De 2.77 até 4.12 Média 3.50

Tabela 4: Caracterização quantitativa dos domínios gamaespectrométricos-texturais.

O domínio TC (em referência ao Complexo Granitóide Três Córregos) representa uma ampla variedade de respostas gamaespectrométricas.

### *8.3.3. Caracterização Geológica dos Domínios gamaespectrométricos-texturais interpretados*

Nesta etapa do trabalho, associa-se as unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas nas fases qualitativa e quantitativa com os pontos de campo. A fim de facilitar a integração dos diferentes dados, foi criado o conceito de unidade integrada, procurando agrupar os domínios e subdomínios gamaespectrométricos e texturais que mais se assemelhem. Foram definidas 16 unidades integradas.

O principal critério utilizado na correlação das informações gamaespectrométricas e texturais foi a sobreposição espacial dos domínios e subdomínios gamaespectrométricos com os domínios texturais da Componente Principal 1. Uma boa sobreposição era indicativo de correlação.

Não foi feita a separação de domínios texturais na CP 1, mas a correlação entre as informações gama e texturais foi realizada durante a interpretação visual dos produtos integrados.

A seguir, serão comentadas as unidades integradas individualmente, unindo as informações extraídas durante a interpretação visual dos produtos integrados e as observações de campo. O mapa geológico da área, resultado deste trabalho, se encontra anexo (Anexo 6).

#### **a) Suítes e Corpos Alcalinos (unidades integradas I1, I2 e I4)**

Os corpos alcalinos da quadrícula Cerro Azul são caracterizados por exibirem as respostas gamaespectrométricas mais elevadas nos canais CT, Th e U. Estas suítes foram subdivididos em duas classes (I1 e I2), baseado em suas respostas gamaespectrométricas. A unidade I4 engloba as regiões afetadas por rochas relacionadas geneticamente à esses eventos (diques e veios de diferentes litologias).

##### **a.1) Unidade integrada I1**

Esta unidade integrada engloba os corpos alcalinos de Mato Preto e Barra do Itapirapuã, apresentando as maiores respostas gamaespectrométricas de toda a quadrícula. Segundo Ferreira & Algarte (1979), as elevadas respostas gamaespectrométricas desses corpos alcalinos se devem as mineralizações de minerais de tório e urânio, principalmente.

Os corpos foram delimitados com base nas formas das anomalias gamaespectrométricas e nos teores dessas anomalias. O contato desses corpos foi alocado nos locais onde havia queda brusca nos teores de Th e U.

## **a.2) Unidade integrada I2**

A unidade integrada I2, que engloba as ocorrências alcalinas de Banhadão, Itapirapuã e Tunas, caracteriza-se por apresentar por elevadas respostas gamaespectrométricas, porém menores que as respostas apresentadas pelos domínios I1 e I4 nos canais CT, Th e U.

## **a.3) Unidade integrada I4**

A unidade integrada I4 engloba áreas próximas as ocorrências alcalinas de Mato Preto e Barra do Itapirapuã. Apresenta altas respostas gamaespectrométricas nos canais CT, Th e U, porém menores que as apresentadas pela unidade integrada I1.

Em campo (pontos C21, C22 e C23), observou-se que a unidade integrada I4 corresponde, litologicamente, a granitos porfiroblásticos (pórfiros de feldspato potássico) foliados. Porém, a elevada resposta gamaespectrométrica encontrada neste domínio foi atribuída aos veios de fluorita que cortam esse granito foliado.

Esses veios de fluorita, que estão associados aos estágios finais da cristalização dessas suítes alcalinas (Mato Preto e Barra do Itapirapuã), são enriquecidas em minerais de tório e urânio.

Os lineamentos extraídos na interpretação fotogeológica da CP1, na área de ocorrência dos corpos alcalinos de Barra do Itapirapuã, Itapirapuã, Mato Preto e Banhadão, são de direção aproximada NW-SE, conferindo com o descrito por Algarte (1972). Segundo este autor, esses corpos estão dispostos segundo a direção NW-SE pois esta direção é um condicionamento estrutural importante no alojamento desses corpos.

## **b) Rochas graníticas (unidade integrada I3)**

### **b.1) Unidade integrada I3**

Esta unidade integrada abrange dois corpos graníticos da área (ver figuras 19 a 22). Mas esses corpos graníticos exibem características distintas dos corpos graníticos do Complexo Três Córregos, pois apresentam baixo teor de potássio e elevados teores de urânio e tório, porém baixa razão U/Th (ver Anexos 3, 4 e 5).

Segundo Vasconcellos *et al.* (1994), de acordo com essas características, esses corpos graníticos podem ser classificados como granitos alcalinos-peralcalinos (tipo A).

## **c) Complexo Três Córregos (unidades integradas TC1, TC1a, TC2 e TC2a)**

Este domínio engloba as unidades integradas que se localizam, de acordo com o mapa geológico, sobre o Complexo Granítico Três Córregos.

Segundo os dados de campo e as respostas gamaespectrométricas, o Complexo Três Córregos foi subdividido em duas unidades principais: os granitos (unidades TC1 e TC1a), e os gnaisses (unidades TC2 e TC2a).

### **c.1) Unidade integrada TC1**

Apresenta alta resposta gamaespectrométrica nos canais CT e K (principalmente).

Esta unidade corresponde as rochas graníticas, porfiroblásticas ou não, com estrutura variando desde isotrópicas até bem foliadas.

Dentro dessa unidade, as regiões onde o granito apresenta porfiroblastos de feldspato potássico bem desenvolvidos e abundantes têm resposta gamaespectrométrica mais elevada do que as regiões com porfiroblastos menos desenvolvidos ou em menor quantidade.

Não foi observada alguma relação entre o grau de deformação dos granitos e a resposta gamaespectrométrica, ou seja, a resposta gamaespectrométrica para os granitos isotrópicos e para os foliados são bastante semelhantes.

Apesar do estado de alteração das rochas (normalmente muito alteradas e cobertas por espessa cobertura de solo), não há muita diferença entre as respostas gamaespectrométricas das rochas graníticas sãs e o solo dessas rochas. Dickson & Scott (1997) relatam que os solos derivados de rochas graníticas normalmente perdem cerca de 20% de seu conteúdo de radioelementos.

### **c.2) Unidade integrada TC1a**

Esta unidade apresenta respostas gamaespectrométricas e feições texturais muito semelhantes às exibidas pela unidade TC1, porém elas se diferem quanto a resposta gamaespectrométrica no canal do urânio: o domínio TC1a apresenta resposta muito maior do que a unidade TC1.

### **c.3) Unidade integrada TC2**

Em campo, foi observado que a unidade TC2 corresponde aos gnaisses descritos na seção 8.1.

A unidade integrada TC2 exibe baixa resposta gamaespectrométrica em todos os canais gama, quando comparado com as respostas gamaespectrométricas dos domínios TC1 e TC1a. A baixa resposta gama se deve à alteração dessas rochas (geralmente, esses gnaisses estavam muito alterados e cobertos por uma espessa camada de solo), pois segundo Dickson & Scott (1997), as rochas gnáissicas perdem entre 25 e 75% do conteúdo de potássio quando estas rochas se alteram para solo.

#### **c.4) Unidade integrada TC2a**

A unidade integrada TC2a têm respostas gamaespectrométricas um pouco maiores que as respostas gamaespectrométricas do domínio TC2. Como não há pontos de campo nas áreas de afloramento TC2a, a maior resposta gamaespectrométrica dessa unidade pode ser atribuída à existência de uma litologia diferente das do domínio TC2, ou ao menor grau de alteração dos gnaisses nessa área.

#### **d) Unidades metassedimentares (Unidades S1, S1a, S1b, S2, S3, S4 e S5)**

##### **d.1) Unidade integrada S1, S1a e S1b**

Corresponde aos metassedimentos do Subgrupo Lajeado e da Formação Água Clara. Esses metassedimentos são facilmente distinguíveis das outras rochas pois exibem as menores respostas gamaespectrométricas de toda a área.

Essa unidade foi subdividida nas unidades integradas S1a e S1b com base nas texturas: ambas possuem características texturais que as diferem entre si e as diferem da unidade integrada S1. Enquanto a unidade integrada S1a possui um relevo mais suavizado, a unidade S1b exibe relevo com vales mais esculpidos. As formas de relevo da unidade S1b são típicas de terrenos carbonáticos.

Com base no mapa geológico, a unidade integrada S1a corresponde aos xistos das formações Água Clara e do Subgrupo Ribeira, enquanto que a unidade integrada S1b corresponde às rochas carbonáticas da Formação Água Clara.

##### **d.2) Unidade integrada S2**

A unidade integrada S2 corresponde aos metassedimentos da Formação Perau. As rochas dessa unidade exibem respostas gamaespectrométricas menores que as rochas vizinhas.

##### **d.3) Unidade integrada S3**

Esta unidade integrada engloba os metassedimentos do Subgrupo Ribeira. É caracterizada por apresentar relevo bem condicionado pelas estruturas das rochas. Além disso, apresenta maior resposta gamaespectrométrica (em todos os canais gama) com relação às unidades vizinhas.

#### **d.4) Unidade integrada S4**

Corresponde às litologias da Formação Capiru. Esta unidade apresenta resposta gamaespectrométrica maior que as respostas exibidas pela unidade vizinha, além de apresentar relevo fortemente condicionado pelas estruturas.

#### **d.5) Unidade integrada S5**

Representa as litologias da Faixa Itaiacoca. Nesta unidade, houve boa sobreposição das unidades gamaespectrométricas (em todos os canais) com as texturas apresentadas na 1ª CP. Ou seja, houve uma boa sobreposição entre o relevo da área, que é mais suave e aplainado do que as das unidades integradas vizinhas, com as respostas gamaespectrométricas, que são maiores do que as respostas das unidades fronteiriças.

#### **d) Complexo Gnáissico-Migmatítico (E1)**

Esta unidade é caracterizada por apresentar respostas gamaespectrométricas médias em todos os produtos integrados, e é perfeitamente discernível dos domínios vizinhos por apresentar respostas gamaespectrométricas mais elevadas.

## 9. CONCLUSÕES

As principais conclusões extraídas durante a execução deste trabalho podem ser enumeradas da seguinte forma:

1. A integração dos dados gamaespectrométricos com as imagens TM-Landsat pelo método *pseudocolor colordrape* gerou produtos de fácil interpretação visual.

2. Dos produtos integrados, os que apresentaram melhor desempenho na discriminação das unidades geológicas foram os produtos (CT) /1ª CP e K /1ª CP. Os produtos U /1ª CP e Th /1ª CP produziram respostas de difícil interpretação. Os produtos (Th/K) / 1ª CP, (U/K) / 1ª CP e (U/Th) / 1ª CP foram utilizados para se obter informações adicionais sobre as unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas.

3. Na caracterização dos domínios gamaespectrométricos-texturais foram individualizados quatro domínios e dezesseis subdomínios. As respostas gamaespectrométricas mais baixas estão associadas ao domínio S, sendo interpretadas como rochas sedimentares. O domínio I representa unidades gamaespectrométricas que foram interpretadas como corpos derivados de intrusões. O domínio E, de pequena expressão espacial, representa a unidade gamaespectrométrica-textural que foi interpretada como rochas do embasamento. O domínio TC engloba respostas as altas e baixas gamaespectrométricas apresentadas pelas litologias do Complexo Granítico Três Córregos.

4. O domínio TC foi subdividido nas unidades TC1 e TC2. Em campo, foi observado que essas unidades correspondem à dois domínios litológicos diferentes, não delimitados no mapa geológico mais recente: os granitos e os gnaisses. Este trabalho propõe alterações no mapa geológico existente, em especial quanto à subdivisão do Complexo Granítico Três Córregos.

5. As unidades I1 e I2 foram interpretadas como suítes alcalinas, porém há pequenas diferenças entre essas duas unidades: a unidade I1 (que corresponde às suítes alcalinas de Mato Preto e Barra do Itapirapuã) apresenta respostas gamaespectrométricas mais altas do que as outras suítes alcalinas devido ao enriquecimento em urânio e tório dessas suítes.

6. As altas respostas gamaespectrométricas apresentadas pela unidade I4 foram atribuídas aos veios de fluorita que cortam as litologias da área abrangida por esta unidade.

7. Os granitos da unidade TC1 e TC1a apresentam características distintas dos granitos da unidade I3: enquanto as unidade TC1 e TC1a apresentam alto teor de potássio e baixo teores de Th e U, a unidade I3 apresentam características inversas. A unidade I3 engloba granitos que podem ser classificados como granitos alcalinos-peralcalinos.

8. Os metassedimentos foram subdivididos em sete unidades gamaespectrométricas-texturais diferentes. Como as respostas gamaespectrométricas dessas unidades são bastante semelhantes, essa subdivisão se deve mais aos fatores texturais do que gamaespectrométricos.

9. Os dados de campo confirmam as interpretações feitas e reforçam a importância do uso de produtos integrados TM-Landsat 5 e gamaespectrométricas no mapeamento geológico.

10. O mapa geológico elaborado neste trabalho representa um esboço regional das unidades geológicas caracterizadas a partir das assinaturas gamaespectrométricas e texturais. A validade dessa interpretação deverá ser confirmada com mais estudos de campo, principalmente na área do Complexo Granítico Três Córregos.

11. Devem ser realizados estudos mais elaborados na área de Complexo Granítico Três Córregos, visando um melhor conhecimento das relações entre os gnaisses e os granitos encontrados neste complexo, além do refinamento dos contatos geológicos, se houver a necessidade.

## 10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. (1956) Novas ocorrências de fósseis no Pré-Cambriano brasileiro. Anais da Academia Brasileira de Ciências, São Paulo, v. 29, n.1, p.63-72.
- ALGARTE, J.P. (1972) A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas nos estados de São Paulo e Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Belém, 1972. Anais. Belém, SBG, v. 1, p. 65-69.
- BIGARELLA, J.J.; SALAMUNI, R. (1956) Estudos preliminares na Série Açungui V Estruturas organógenas nos dolomitos da Formação Capiru (Estado do Paraná). Dusenya, Curitiba, v.7, n. 6, p. 317-323.
- CANADIAN CENTER FOR REMOTE SENSING (1999) Fundamentals of Remote Sensing Tutorial. Disponível na Internet: <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/eduref/tutorial/tutore.html>
- CAMPANHA, G.A.C. (1991) Tectônica Proterozóica no Alto e Médio Vale do Ribeira, Estados de São Paulo e Paraná. São Paulo, 296 p. (Tese – Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- CAMPANHA, G.A.C.; GIMENEZ, A.; BISTRICHI, C.A. (1996) Geologia da folha Itararé (SG.22-X-B). São Paulo, IPT, 31 p. (Minuta de Relatório)
- CPRM-BARMP (1997) Brazil Airborne Radiometric Mapping Project. Technical Report and Survey Atlas. CPRM, Rio de Janeiro.
- CRÓSTA, A. P. (1992) Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto. Campinas, IG/UNICAMP, 170 p.
- DICKSON, B. L.; SCOTT, K. M. (1997) Interpretation of aerial gamma-ray surveys. AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, n. 2, p. 187-200.
- ER MAPPER (1995) Applications Manual. 339p.
- FERREIRA, F.J.F.; ALGARTE, J.P. (1979) O comportamento aeromagnético-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 2, São Paulo, 1979. Atas. São Paulo, SBG, p. 105-208.
- GALBRAITH, J.H.; SAUNDERS, D.F. (1983) Rock classification by characteristics of aerial gamma-ray measurements. Journal of Geochemical Exploration, v. 18, p. 49 -73.
- INPE (1998) Spring: Tutorial de Geoprocessamento. Disponível na Internet: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/index.html>
- LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. (1994) Remote sensing and image interpretation. New York, John Wiley & Sons, 733 p.

- MADRUCCI, V. (1999) Avaliação dos produtos integrados TM-Landsat, Radarsat e Gamaespectrométricos na Caracterização Tectônica e Mapeamento Geológico de Área Mineralizada em Ouro na Região de Alta Floresta – MT. São José dos Campos, 159 p. (Dissertação – Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- MATHER, P.M. (1987) Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. New York, John Wiley & Sons, 352p.
- O'LEARY, D.W.; FRIEDMAN, J.D.; POHN, H.A. (1976) Lineament, linear, lineation: some proposed new standards for old terms. Geological Society of America Bulletin, v. 87, n. 10, p. 1463-1469.
- PARRO, P.S. (1998) Magnetometria e Gamaespectrometria aerotransportadas na Interpretação Geológico-Estrutural da Região dos rios Juruena e Teles Pires – MT. Brasília, 63 p. (Dissertação – Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.
- PIERKARZ, G.F. (1981) Reconhecimento de unidades correlacionáveis à seqüência mineralizada do Perau, Estado do Paraná. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1981. Atas. Curitiba, SBG, 417 p.
- RICHARDS, J.A (1993) Remote Sensing Digital Image Analysis: an Introduction. Berlin, Springer Verlag, 340p.
- SANTOS, A.R. (1986) Estudos sobre a tectônica de fraturamento na região do Quadrilátero Ferrífero e em partes do Complexo Migmatítico-Granulítico de Minas Gerais, com base em sensoriamento remoto. São Paulo, 172p. (Tese - Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- SHIMABUKURO, Y.E; NOVO, E.M.L.M.; MERTES, L.A.K. (1998) Mosaico digital de imagens Landsat-TM da planície do rio Solimões-Amazonas no Brasil. São José dos Campos, 45p. Relatório INPE-6746-RPQ/681.
- SOARES, P.C.; FIORI, A.P. (1976) Lógica e sistemática em análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Notícia geomorfológica, v. 16, n. 32, p. 71-104.
- TAKAHASHI, A.T. *et al.* (1981) Projeto integração e detalhe no Vale do Ribeira, área Ribeirão do Perau. São Paulo, convênio DNPM/CPRM.
- VASCONCELLOS, R. M.; METELO, M. J.; MOTTA, A.C.; GOMES, R. D. (1994) Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil. Rio de Janeiro, CPRM, 165 p.

# Anexos

Unidad	Actividad	Fecha	Calificación
1	Actividad 1	12/01/2023	8.5
2	Actividad 2	19/01/2023	7.8
3	Actividad 3	26/01/2023	9.2
4	Actividad 4	02/02/2023	8.1
5	Actividad 5	09/02/2023	7.5
6	Actividad 6	16/02/2023	8.9
7	Actividad 7	23/02/2023	7.3
8	Actividad 8	01/03/2023	8.7
9	Actividad 9	08/03/2023	7.6
10	Actividad 10	15/03/2023	8.4
11	Actividad 11	22/03/2023	7.9
12	Actividad 12	29/03/2023	8.6
13	Actividad 13	05/04/2023	7.7
14	Actividad 14	12/04/2023	8.3
15	Actividad 15	19/04/2023	7.4
16	Actividad 16	26/04/2023	8.8
17	Actividad 17	03/05/2023	7.2
18	Actividad 18	10/05/2023	8.5
19	Actividad 19	17/05/2023	7.6
20	Actividad 20	24/05/2023	8.9
21	Actividad 21	31/05/2023	7.3
22	Actividad 22	07/06/2023	8.7
23	Actividad 23	14/06/2023	7.5
24	Actividad 24	21/06/2023	8.4
25	Actividad 25	28/06/2023	7.8
26	Actividad 26	05/07/2023	8.6
27	Actividad 27	12/07/2023	7.4
28	Actividad 28	19/07/2023	8.9
29	Actividad 29	26/07/2023	7.2
30	Actividad 30	02/08/2023	8.5
31	Actividad 31	09/08/2023	7.6
32	Actividad 32	16/08/2023	8.8
33	Actividad 33	23/08/2023	7.3
34	Actividad 34	30/08/2023	8.7
35	Actividad 35	06/09/2023	7.5
36	Actividad 36	13/09/2023	8.4
37	Actividad 37	20/09/2023	7.8
38	Actividad 38	27/09/2023	8.6
39	Actividad 39	04/10/2023	7.4
40	Actividad 40	11/10/2023	8.9
41	Actividad 41	18/10/2023	7.2
42	Actividad 42	25/10/2023	8.5
43	Actividad 43	01/11/2023	7.6
44	Actividad 44	08/11/2023	8.8
45	Actividad 45	15/11/2023	7.3
46	Actividad 46	22/11/2023	8.7
47	Actividad 47	29/11/2023	7.5
48	Actividad 48	06/12/2023	8.4
49	Actividad 49	13/12/2023	7.8
50	Actividad 50	20/12/2023	8.6

Anexo 1 – Pontos de Campo

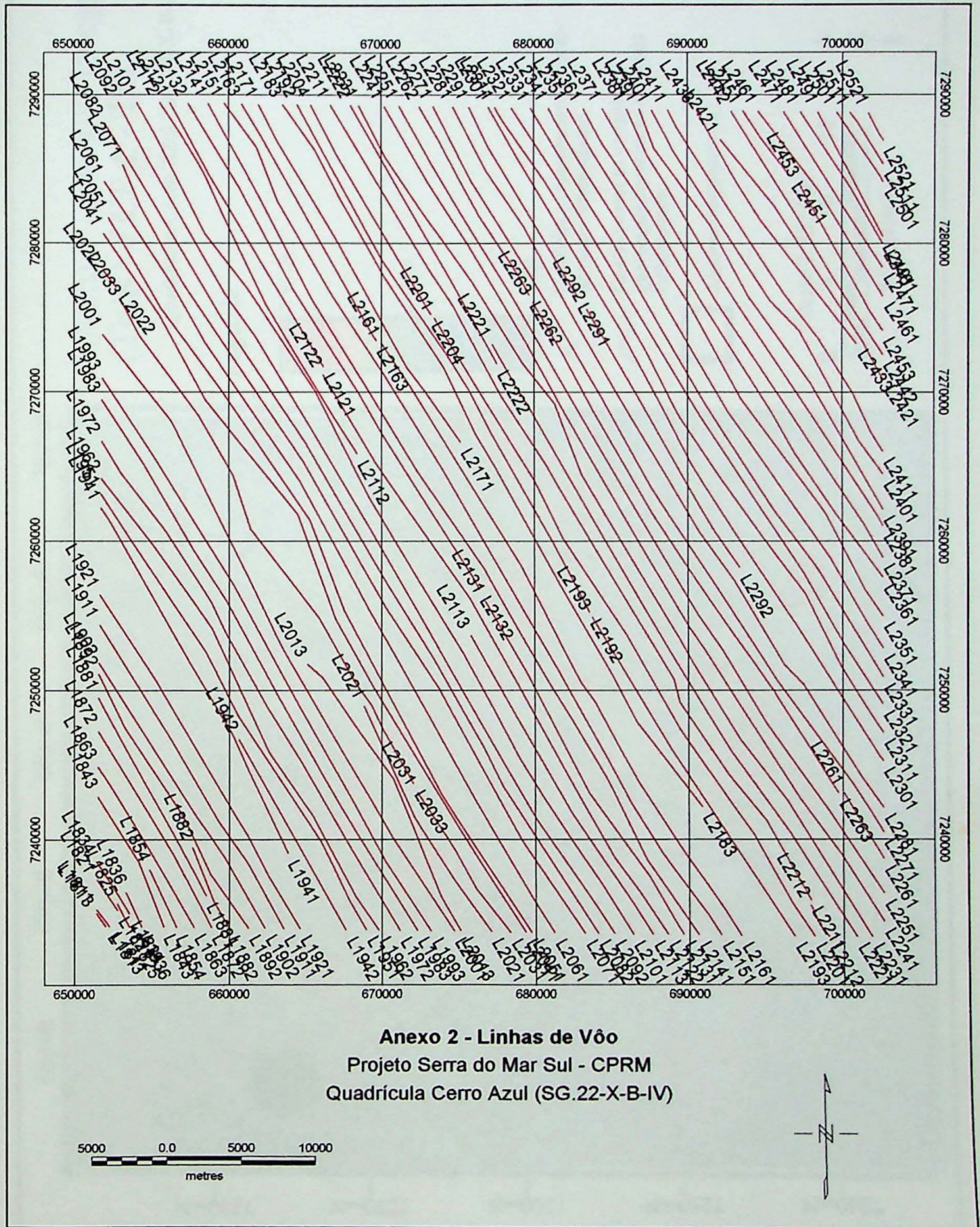
Ponto	Coordenadas UTM oeste	Coordenadas UTM norte	Descrição Litológica
C1	687729	7275902	Granito porfirítico alterado. Granulometria média a grossa. Os porfiroblastos são de feldspato potássico, e chegam a ter 3 cm. A rocha apresenta incipiente foliação.
C2	687334	7274712	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior.
C3	687163	7273977	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior.
C4	687210	7273621	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior, porém com porfiroblastos de menor tamanho.
C5	687667	7272937	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior.
C6	687463	7276359	Granito porfirítico de granulometria média, milonitizado.
C7	684538	7284375	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior.
C8	683746	7286229	Granito porfirítico semelhante ao do ponto anterior.
C9	682804	7287440	Rocha calciossilicática.
C10	682049	7287908	Gnaiss migmatítico.
C11	677933	7288358	Gnaiss foliado
C12	677565	7286561	Gnaiss foliado.
C13	674177	7283228	Quartzitos.
C14	674071	7282215	Gnaiss foliado.
C15	674413	7280039	Gnaiss foliado.
C16	674096	7273285	Granito porfirítico isótropo.
C17	674125	7272271	Granito porfirítico isótropo.
C18	673113	7270438	Rocha ultrabásica (Maciço de Itapirapuã).
C19	671697	7270220	Granito porfirítico isótropo.
C20	669502	7265326	Granito porfirítico foliado.
C21	683591	7261095	Carbonatito?

1 C são os pontos visitados durante o trabalho de campo, enquanto que G são os pontos de campo cedidos pelo prof. Ginaldo.

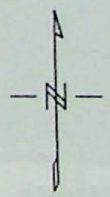
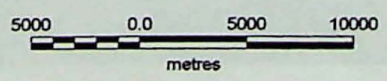
C22	683574	7259703	Granito porfírico levemente foliado cortado por diques de lamprófito, de rocha básica-ultrabásica e veios de fluorita.
C23	684097	7259630	Veio de fluorita.
C24	683370	7259231	Migmatito.
C25	683928	7258934	Dolomito?
C26	683697	7258996	Granito porfírico milonitizado.
C27	670854	7261899	Granito porfírico levemente foliado.
C28	666575	7263249	Granito porfírico milonitizado.
C29	660155	7272681	Granito porfírico milonitizado.
C30	660049	7276680	Granito porfírico milonitizado.
C31	659668	7277333	Granito fino (Próximo do contato com os filitos).
C32	659536	7277549	Filito.
C33	658390	7279748	Mármore?
C34	661123	7281822	Filito.
C35	662654	7281840	Filito c/ níveis siltosos.
C36	663740	7284152	Filito.
C37	663969	7284188	Quartzito.
C38	670513	7282231	Gnaise.
C39	684931	7282242	Granito porfírico milonitizado (+gnaise migmatítico?).
G6	682797	7287435	Calciossilicáticas/micaxistos.
G10	689001	7268446	Calcário.
G11	689080	7265635	Calcário.
G12	688213	7265637	Calcário.
G13	689623	7265224	Filito.
G14	689977	7265145	Filito/mármore.

G15	698712	7271356	Calcário.
G16	701133	7271805	Gabro/mármore.
G17	701765	7273191	Metagabro.
G18	701935	7273389	Mármore/xisto.
G19	700835	7266614	Filito/metarenito.
G20	699251	7265871	Metarenito micáceo, argiloso.
G21	699111	7266137	Metarenito bandado.
G22	698965	7266416	Metarenito bandado.
G23	698542	7266385	Metarenito/metapelitos.
G24	698386	7266605	Metarenitos/filitos.
G25	697794	7266352	Calcário.
G37	701796	7251546	Veio de quartzo.
G78	662195	7288950	Xisto.
G79	662166	7287015	Granito.
G80	658649	7280597	Mármore dolomítico.
G81	659840	7278229	Filito bandado (metarritmito).
G83	660050	7278099	Filitos/granitóide.
G84	659631	7277623	Filitos/xistos.
G85	659122	7273949	Granito.
G86	660208	7272667	Granito gnáissico.
G87	661287	7269187	Granito porfírico.
G88	665455	7264031	Biotita granito porfírico.
G89	666601	7263250	Granito porfírico cataclástico.
G90	672799	7259947	Xisto.
G91	674262	7258696	Muscovita xisto com estauroilita ou andalusita.

G92	674162	7257771	Granito porfirítico/básicas.
G93	675219	7256185	Granito porfirítico/calciossilicática.
G94	677584	7252023	Granito porfirítico milonítico.
G95	677723	7251854	Calcário calcítico/granito milonito.
G96	678609	7251134	Metarenito arcoseano/filitos.
G97	678949	7250945	Filitos.
G99	679674	7250583	Filito laminado.
G100	681122	7249919	Metabasito/filitos e calcários.
G101	682031	7248771	Granito porfirítico.
G102	684267	7244909	Granito porfirítico.
G103	686564	7243400	Filito porfiroblástico.
G104	687274	7242980	Metabasito/filito.
G106	687142	7241495	Metarritmitos/filitos bandados.
G107	690216	7240084	Alcalina.
G108	691062	7238650	Filitos bandados.
G109	693625	7236589	Filito laminado.
G110	694371	7236827	Anfibólito.
G111	695443	7237322	Quartzito xistoso.
G112	695914	7237350	Rocha básica.
G113	699385	7234013	Quartzito/quartzo filito laminado.



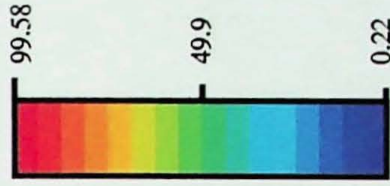
**Anexo 2 - Linhas de Vôo**  
 Projeto Serra do Mar Sul - CPRM  
 Quadrícula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)



# Anexo 3 - Produto Integrado (Th/K) / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

Legenda

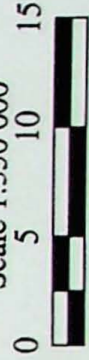


A  
Unidades gamaespectrométricas-  
texturais interpretadas

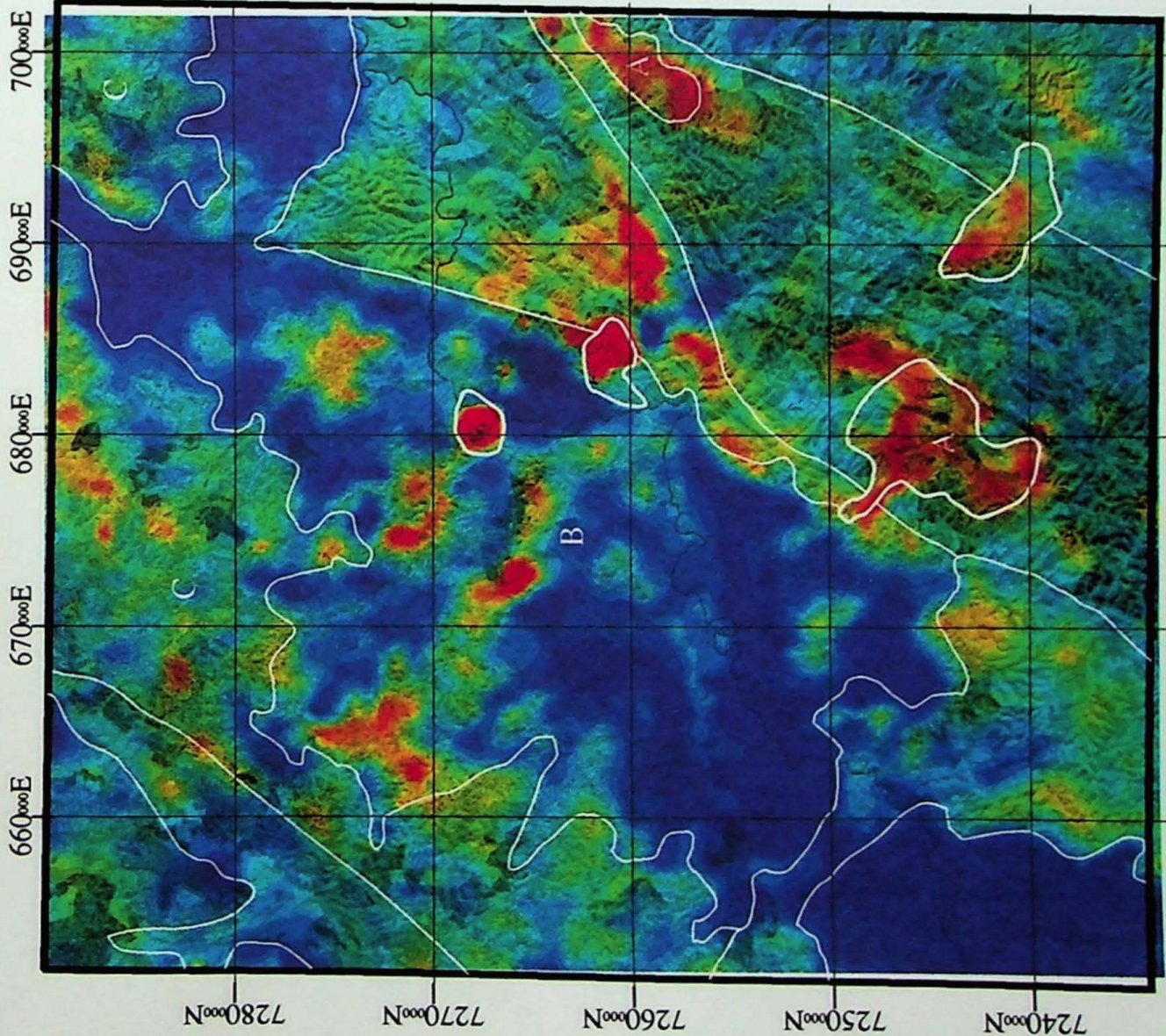
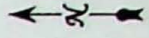
Contato entre as unidades  
gamaespectrométricas-texturais  
interpretadas

Limites da quadricula

Scale 1:350 000



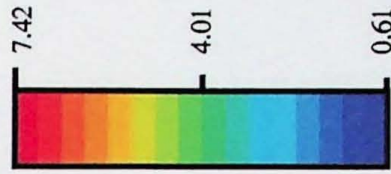
Kilometers



# Anexo 4 - Produto Integrado (U/K) / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

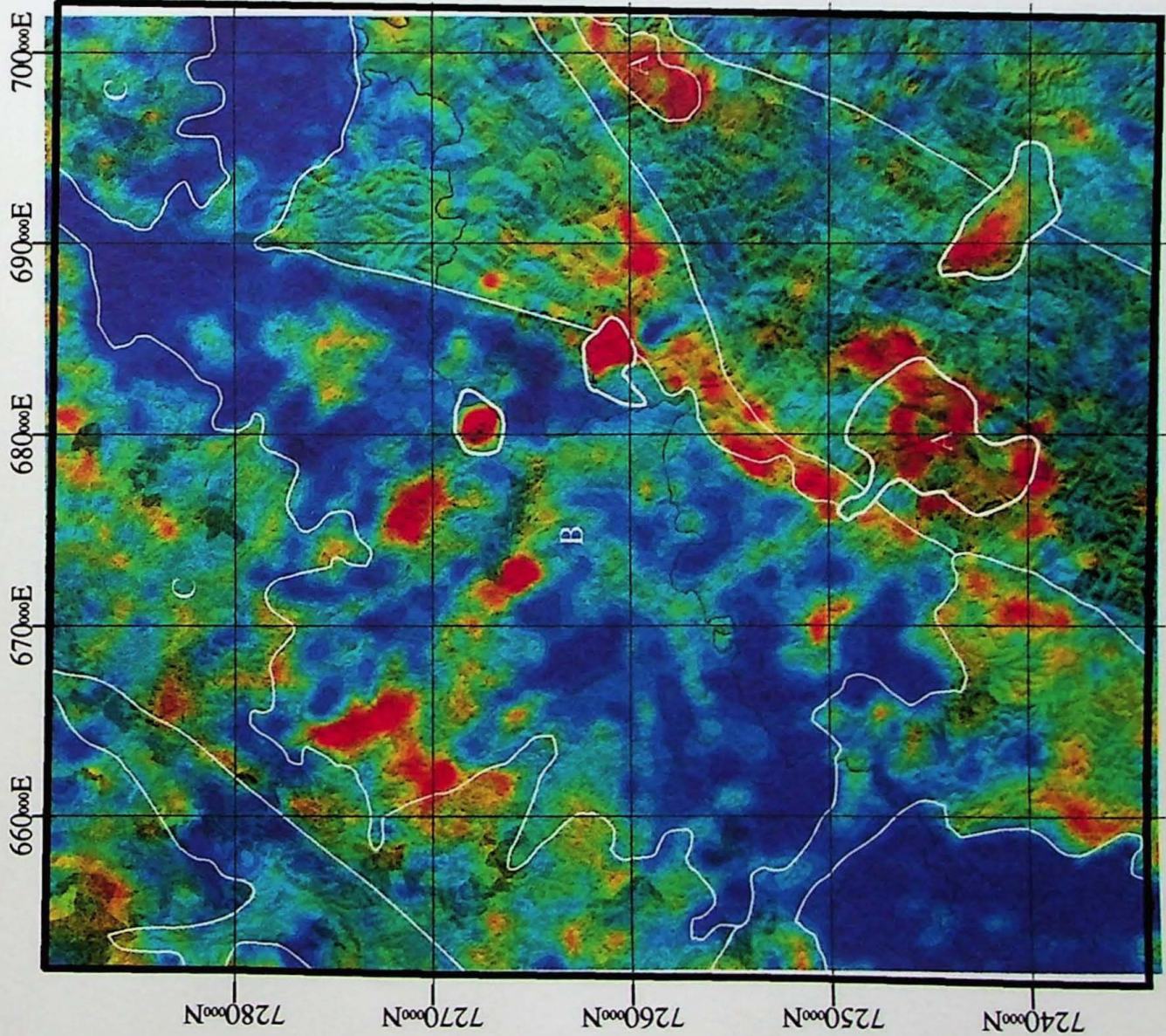
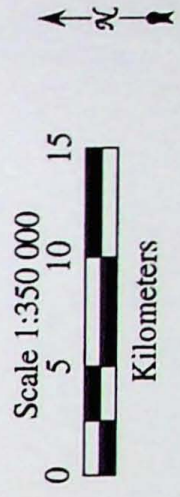
Legenda



A Unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas

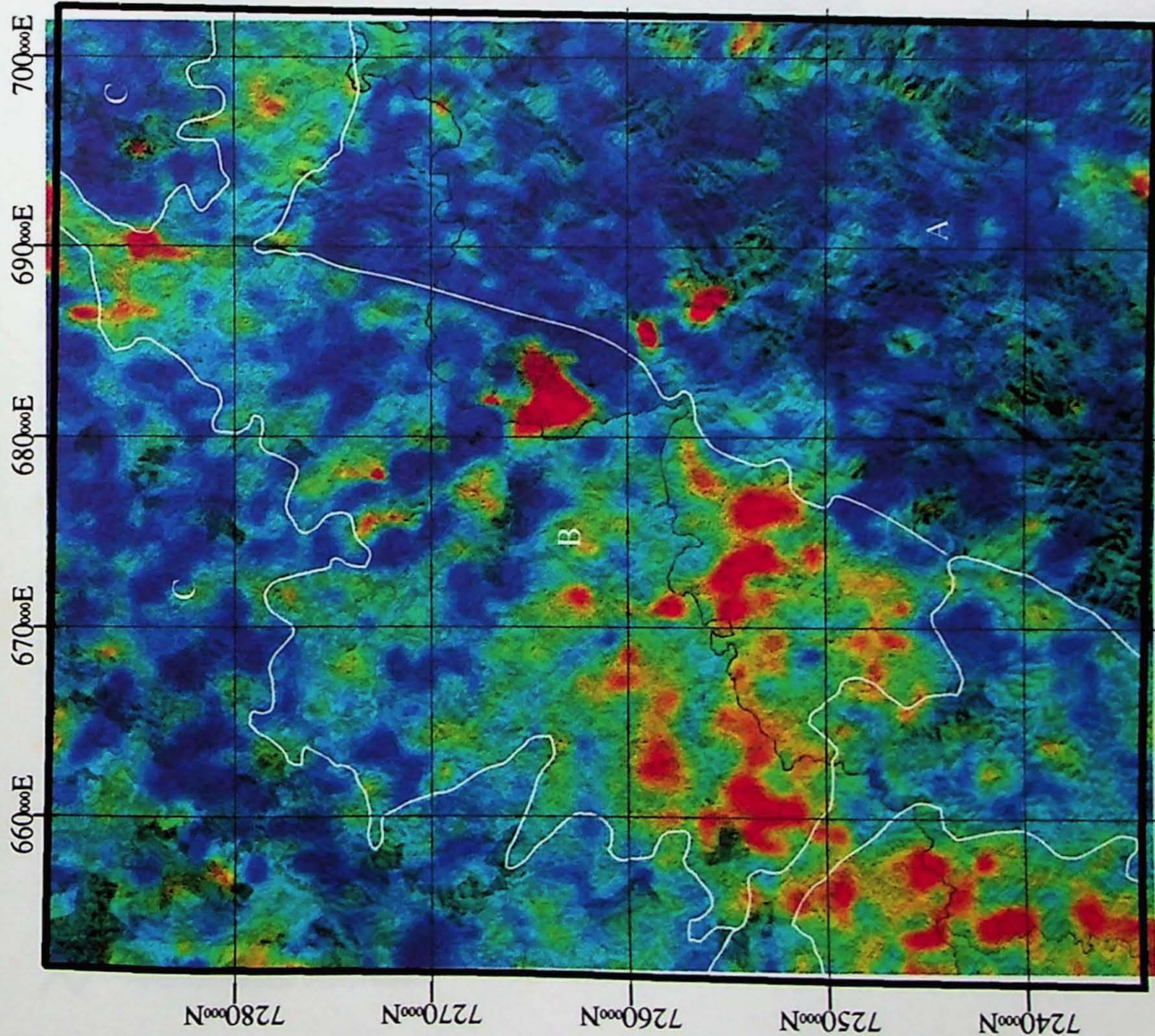
Contato entre as unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas

Limites da quadricula

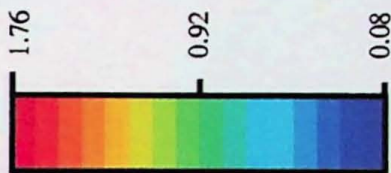


# Anexo 5 - Produto Integrado (U/Th) / CP 1 - TM

Quadricula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)



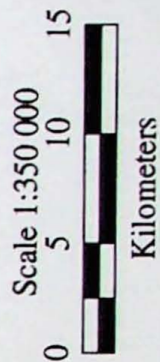
Legenda

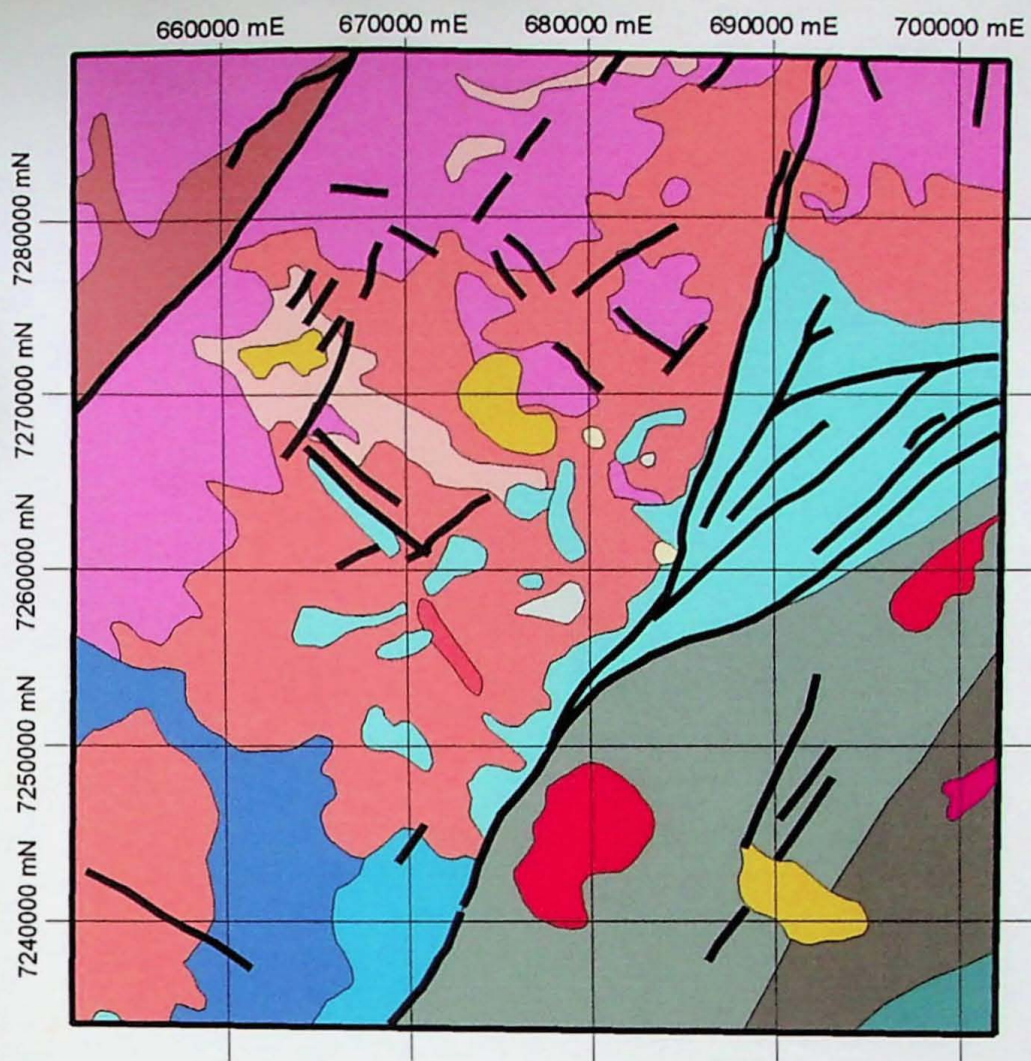


A Unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas

Contato entre as unidades gamaespectrométricas-texturais interpretadas

Limites da quadricula





## Anexo 6 - Mapa Geológico

Quadrícula Cerro Azul (SG.22-X-B-IV)

### Legenda

- Cretáceo**
- Suítes alcalinas I1
  - Suítes alcalinas I2

- Neoproterozóico**
- Granitóides Sin- a tardi-tectônicos alcalinos-peralcalinos (I3)
  - Granitóides Sin- a Tardi-tectônicos (Complexo Granítico Três Córregos)
  - TC1
  - TC 1a

- Mesoproterozóico**
- Grupo Itaiacoca e correlatos (S5)
  - Formação Água Clara e Subgrupo Lajeado (e correlatos)
  - S1
  - S1a
  - S1b
  - Subgrupo Ribeira e correlatos (S3)
  - Formação Perau e correlatos (S2)
  - Formação Capiru e correlatos (S2)

- Paleoproterozóico**
- Complexo Gnáissico-Migmatítico (E1)

- Indiviso**
- Gnaisses e metassedimentos
  - TC2
  - TC2a

⚡ Fotolineamentos interpretados

