

UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

ANÁLISE VARIOGRÁFICA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADOS À ÁREA DA SUÍTE INTRUSIVA DE ITU (SP)

Edson dos Santos Correa Ribeiro

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Este exemplar corresponde 👘 a redoção final da tese defendida por EQSON DOS SANTOS C. RIBEIRO e oproyada pola Continas Julgadora ...4 em - Car es DOR ORTENTA

CAMPINAS - SÃO PAULO

Jan - 1994

R354a

ĵ.		8
22AVAdate	UNICAMP	VOLULA NO.
	BIBLIOTECA CENTRAL	Trough diver
<u> News</u> e		NWN N

 $\gamma = - p_{\lambda} p_{\lambda} \varphi (\zeta + \tau)$ J.G. 1410 201



UNICAMP

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

and the second second

ANÁLISE VARIOGRÁFICA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS APLICADOS À ÁREA DA SUÍTE INTRUSIVA DE ITU (SP)

Edson dos Santos Correa Ribeiro 35¹⁴

Dissertação apresentada ao Instituto de Geociências como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências - Área de Metalogênese

Orientador:Prof. Dr. Armando Zaupa RemacreIG/UNICAMPCo-Orientador:Prof. Dr. Gilberto AmaralIG/UNICAMP

IG- 01/94

CAMPINAS - SÃO PAULO

Jan - 1994

UNILAMP BIBLIOTEGA CENTRAL

CHAMADA:	
R354 Q	
DMB0 BC/ 2/1/195	The state of the s
	CONTRACTOR DATES
RECT CAL SCO DO	
* CPD	fi)

CN-00657936-3

R354a Ribeiro Edson dos Santos Correa						
1000 14	Análico veriográfico o processmente digital					
	Analise variografica e processamento ugita					
	de imagens aplicados à área da Suite Intrusiva					
	de Itu (SP). Universidade Estadual de					
	Campinas -UNICAMP. Instituto de Geociências.					
	Área de Metalogênese, 1994.					
	136p. (Dissertação de Mestrado)					
	Inclui bibliografia					
	1. Processamento Digital de Imagens -					
	Geoestatística 2. Sistema Geográfico de					
	Informações					
CDD - 621.3678						

ł



UNICAMP

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:

Análise Variográfica e Processamento Digital de Imagens Aplicados à Área da

Suíte Granítica de Itu (SP)

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

AUTOR:

Edson dos Santos Correa Ribeiro

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre

CO-ORIENTADOR:

Prof. Dr. Gilberto Amaral

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre PRESIDENTE: Dr. Fernando Pellon de Miranda EXAMINADORES: Prof. Dr. Alvaro Penteado Crósta

CAMPINAS, DE DE 1994

Aos meus pais, Oswaldo e Mary, pela força que sempre me deram.

AGRADECIMENTOS

O encerramento de uma dissertação é o coroamento de um trabalho de longo prazo, durante o qual a ajuda de inúmeras pessoas se torna indispensável e inesquecível. Os abaixo citados se destacaram, de uma forma ou de outra, por sua colaboração mais efetiva e direta, porém eu estendo aqui minha gratidão a todos aqueles que garantiram as condições necessárias para se atingir o objetivo final.

A gratidão aqui manifestada nada é, quando comparada com a amizade fruto desta jornada. Os amigos conquistados são em verdade o maior prêmio que se pode esperar de qualquer trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Armando Zaupa Remacre, pela receptividade diante de uma nova temática, pela liberdade de trabalho proporcionada, pelas intervenções oportunas e precisas, pelo inquestionável apoio e esforço para a obtenção de toda a infra-estrutura necessária, e pela amizade resultante deste trabalho conjunto.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Gilberto Amaral, e à Prof^a Dr^a Elisabete Maria Pascholati, pela obtenção das imagens Landsat TM, pela cessão dos dados geofísicos e geoquímicos, pela cessão de amostras de campo, pelas discussões e acompanhamento das diversas etapas de trabalho, incluindo as visitas ao campo, pelas muitas lições aprendidas e pela amizade sempre demonstrada.

Ao engenheiro Moacir, à analista Patrícia e ao estagiário José Fábio, pelo apoio fundamental na área de informática, pela boa vontade com que se dedicaram à solução dos problemas diários enfrentados e pela paciência que tiveram neste processo de formação em informática de um geólogo.

Ao Prof. Dr. Wladimir Shukowsky, do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, pela excelência e simpatia demonstradas na discussão do processamento dos dados aerogeofísicos e pela cessão dos programas auxiliares por ele desenvolvidos.

Aos demais professores do Departamento de Metalogênese e Geoquímica, pelas discussões específicas que colaboraram com a solução de questões levantadas durante as etapas de trabalho.

Aos colegas de mestrado, pelas discussões proporcionadas, pelo companheirismo e pelas horas de lazer indispensáveis para a conclusão desta dissertação.

Aos demais funcionários do Instituto de Geociências da UNICAMP, de cuja eficiência e boa vontade em muito dependemos, agradeço pela atenção e cordialidade a mim dispensadas.

Aos amigos Vinícius, Plínio e Rosa, remanescentes mais próximos de minha graduação, pelo apoio e incentivo manifestados.

À Gisele, pela paciência e apoio.

Ao CNPq e à FAPESP, pelas bolsas de mestrado obtidas e pelo acompanhamento, por parte desta última, de todo o trabalho realizado, com importante contribuição e reconhecimento.

Finalmente, agradeço ao convênio PADCT/FINEP, cujo projeto nº 65920050-00 possibilitou a expans ⊧o do Laboratório de Processamento de InformaçΣes Georeferenciadas (LAPIG), mantendo-o em condições de vanguarda dentro do cenário nacional.



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS ÁREA DE METALOGÊNESE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RESUMO

ANÁLISE VARIOGRÁFICA E PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

APLICADOS À ÁREA DA SUÍTE INTRUSIVA DE ITU (SP)

Edson dos Santos Correa Ribeiro

Neste trabalho é apresentado um novo algoritmo de caracterização textural de imagens por variogramas, o qual alia os avanços obtidos pelos métodos anteriores com inúmeras facilidades operacionais, tais como a seleção do tipo de variograma a ser calculado, a pronta relação entre a estrutura observada no variograma e as dimensões das janelas utilizadas no processo de classificação e a possibilidade de utilização de diferentes algoritmos de classificação supervisionada, graças à geração de bandas texturais que podem ser processadas em qualquer sistema digital disponível.

A Suíte Granítica de Itu (SP) foi utilizada como área de estudo, sendo suas características geológicas integradas por um Sistema Geográfico de Informações para a seleção de áreas de maior potencial mineral. Diagramas previsionais a partir de dados geoquímicos e geofísicos permitiram a redução da área prospectável para 16 % do total de exposição da Suíte, com um índice de acertos de 70 % sobre as ocorrências conhecidas da área (5/7).

O processamento digital das imagens Landsat TM não apresentou bons resultados, devido essencialmente à intensa ocupação humana, à cobertura vegetal, às reduzidas dimensões das ocorrências minerais, sem regiões de expressiva alteração hidrotermal, e à não correspondência entre os fácies graníticos mapeados e as heterogeneidades marcadas pelas imagens.

A inclusão das bandas texturais no algoritmo de classificação aumenta o rigor de seleção das classes, aumentando o número de pixels não classificados e diminuindo o número de pixels mal classificados. Para uma classificação supervisionada por máxima verossimilhança sobre as bandas originais e as bandas texturais geradas a partir da banda TM 7, o índice de pixels classificados erroneamente foi reduzido de 22.1 para 8.5 %. Não obstante, não foram identificadas características radiométrico/texturais distintivas dos fácies graníticos. Resultados idênticos foram obtidos para as áreas de maior potencial prospectivo e para as ocorrências minerais conhecidas.



UNICAMP

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ABSTRACT

VARIOGRAPHICAL ANALYSIS AND DIGITAL PROCESSING OF IMAGES

APPLIED TO THE INTRUSIVE SUITE OF ITU (SAO PAULO STATE)

Edson dos Santos Correa Ribeiro

In this paper a new algorithm of textural characterisation of images by variograms is presented which allies progress achieved by previous methods with innumerable operational facilities, such as the selection of the type of variogram to be calculated, the immediate relationship between the structure observed in the variogram and the dimension of the windows utilised in the classification process and the possibility of utilisation of different algorithms of supervised classification, thanks to the generation of textural bandas which may be processed in any available digital system.

The Granitic Suite of Itu was used as a study area, its geological characteristics being integrated by a Geographical Information System for the selection of areas of greater mineral potential. Previsional diagrams based on geochemical and geophysical data permitted the reduction of the area to be prospected by 16 % of the total exposure of the Suite, with a margin of success of 70 % on all known occurrences in the area (5/7).

The digital processing of the Landsat TM images did not produce good results, mainly due to the intensive human occupation, the vegetation cover, the reduced dimensions of mineral occurrences with no regions with expressive hydrotermal alteration, and the heterogeneities marked by the images.

The inclusion of textural bands in the algorithm of classification increases the rigour of class selection, increasing the number of non-classified pixels and reducing the number of the badly classified pixels. For a classification supervised with the *maxver* on the original bandas and the textural bandas generated from the TM 7 band, the ratio of erroneously classified pixels was reduced from 22.1 to 8.5%. However, no distinctive radiometric/textural characteristics of the granitic facies were identified. Identical results were observed for the areas of greater prospective potential as well as for the known mineral occurrences.

INDICE

AGRADECIMENTOS	ü
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
INDICE	vi
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE FOTOS	x
INDICE DE TABELAS	xiii
1.INTRODUÇÃO	1
1.1.APRESENTAÇÃO DO TEMA	1
1.2.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS	4
2.1 INTRODUCÃO	4
2.2 CONCEITOS BÁSICOS	4
2.3. CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS	5
2.3.1.FILTROS TEXTURAIS	6
2.3.2.MATRIZES DE CO-OCORRÊNCIA	7
2.3.3.ESPECTROS TEXTURAIS	9
2.4. VARIOGRAMAS E SUA APLICACÃO EM IMAGENS	9
2.5. CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS POR VARIOGRAMAS	15
2.5.1.PRINCÍPIOS BÁSICOS UTILIZADOS	15
2.5.2.PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO	20
2.5.3.ALGORITMO PARA A CLASSIFICAÇÃO	
TEXTURAL POR VARIOGRAMAS	24
2.5.4. ESTUDO DE CASO: COMPARAÇÃO COM O STC	26
2.5.4.1.IMAGEM SINTÉTICA	26
2.5.4.2.IMAGEM LANDSAT	29
3.APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	33
3.1.INTRODUÇÃO	33
3.2.LOCALIZAÇÃO E ACESSO	33
3.3.ASPECTOS FISIOGRÁFICOS	34
3.3.1.CLIMA	34
3.3.2.GEOMORFOLOGIA	34
3.3.3.COBERTURA VEGETAL	35
3.3.4.HIDROGRAFIA	35
3.3.5.OCUPAÇÃO	35
3.4.ASPECTOS GEOLÓGICOS	36
3.4.1.GEOLOGIA REGIONAL	36
3.4.2.SUÍTE INTRUSIVA DE ITU	40
3.4.3.ASPECTOS METALOGENÉTICOS	44

4.DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE MAIOR POTENCIAL METALOGENÉTICO	54			
4.1.INTRODUÇÃO				
4.2. TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS	54			
4.2.1.NATUREZA DOS DADOS UTILIZADOS	54			
4.2.2.ANÁLISE ESTATÍSTICA	55			
4.2.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS E GERAÇÃO DAS IMAGENS.	55			
4.2.4.INTERPRETAÇÃO DAS IMAGENS E DISCUSSÕES	62			
4.2.4.1.IMAGENS ORIGINAIS (CANAIS INDIVIDUAIS)	62			
4.2.4.2.IMAGENS DE COMPONENTES PRINCIPAIS, RAZÕES	5			
DE BANDAS E IMAGENS CLASSIFICADAS	64			
4.3. TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS	70			
4.3.1.NATUREZA DOS DADOS	70			
4.3.2.FUSÃO DOS DADOS	70			
4.3.3.GERAÇÃO DAS IMAGENS	71			
4.3.4.DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	76			
4.4.DIAGRAMAS PREVISIONAIS	78			
5.PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT	83			
5.1.INTRODUÇÃO	83			
5.2.CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS IMAGENS	83			
5.3.ANÁLISE ESTRUTURAL	84			
5.4.COMPOSIÇÕES COLORIDAS	86			
5.5.RAZÕES DE BANDAS	93			
5.6.COMPONENTES PRINCIPAIS	96			
5.7.INTEGRAÇÃO DE DADOS PELO USO DO ESPAÇO IHS	99			
5.8.CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS	101			
5.8.1.CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA PELOS FÁCEIS	102			
5.8.2.CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA POR DIAGRAMAS				
PREVISIONAIS	107			
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
6.DISCUSSOES, CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	111			
6.1.RESULTADOS OBTIDOS PARA A AREA DA SUITE INTRUSIVA DE ITU	111			
6.2.AVALIAÇAO DAS TECNICAS UTILIZADAS	113			
	110			
BIBLIOGRAFIA	110			
ANEXO 1. SENSORIAMENTO REMOTO ADI ICADO À CEOLOCIA				
ANEXO 1. DEMONITAMENTO REMOTO AT LICADO A GEOLOGIA				
A 1 CONCEPTOS INICIAIS	A 1			
A 2 CARACTERÍSTICAS RÁSICAS DAS IMAGENS LANDSAT TM	A2			
A 3 PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITE	A5			
A 3 1 ALIMENTO DE CONTRASTE	46			
A 3 9 FILTRAGENS ESPACIAIS	46			
A 3 3 COMPOSIÇÕES COLORIDAS	48			
$\Lambda \Im A BAZÕES DE BANDAS$	Δ0			
A 9 5 COMPONENTES PRINCIPAIS	Δ11			
A 2 C DECORREI ACÃO HSI E AUMENTO DE CONTRASTE	A1/			
$\Delta 2.7$ ANÁLISE DE LINEAMENTOS	Δ16			
A 2 & OUTRAS TÉCNICAS	Δ17			
A 3 0 CLASSIFICACÃO	Δ1Ω			
Δ 3 9 1 CLASSIFICACÃO ΝÃΟ SUDERVISIONADA	Δ10			
A 3 9 2 CLASSIFICACÃO SUDERVISIONADA	Δ10			
A.O.J.A.O.D.L.IORYIC DOI DRIVIDIONDA	110			

.

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	2.1 - Construção de matrizes de co-ocorrência	8
FIGURA	2.2 - Modelo teórico simples de um variograma esférico	10
FIGURA	2.3 - Correlograma entre $Z(x) \in Z(x+h)$	11
FIGURA	2.4 - Variograma experimental hipotético com estruturas imbricadas	12
FIGURA	2.5 - Variogramas para a textura A	17
FIGURA	2.6 - Variogramas para a textura C	18
FIGURA	2.7 - Variogramas para a textura F	19
FIGURA	2.8 - Variogramas para a textura B	20
FIGURA	2.9 - Representação bidimensional de dois variogramas	22
FIGURA	2.10 - Representação dos mesmos variogramas, no espaço tridimensional	.23
FIGURA	2.11 - Variogramas da área urbana de uma imagem Landsat TM 7	29
FIGURA	3.1 - Mapa de localização da Suíte Itu	33
FIGURA	3.2 - Mapa geológico proposto por Galembeck (1991)	43
FIGURA	3.3 - Diagrama mostrando a evolução faciológica da Suíte Itu	44
FIGURA	3.4 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins	49
FIGURA	3.5 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins	49
FIGURA	3.6 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins	50
FIGURA	3.7 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins	50
FIGURA	A.1 - Espectro de absorção da atmosfera no zênite com regiões espectrais	A3
FIGURA	A.2 - Curva de reflectância típica de vegetação verde	A4
FIGURA	A.3 - Espaço de cores RGB	A8
FIGURA	A.4 - Operação de transformação para componentes principais	A12

FIGURA A.5 - Relação entre os espaços de cores RGB e HSI	A15
FIGURA A.6 - Principais métodos de classificação de imagens	A21

INDICE DE FOTOS

FOTO	2.1 - Imagem textural sintética	15
FOTO	2.2 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 1, 3 e 9	27
FOTO	2.3 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 2, 4 e 9	27
FOTO	2.4 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 1, 3 e 7	28
FOTO	2.5 - Imagem resultante de um filtro de medianas aplicado sobre a foto 2.4	28
FOTO	2.6 - Classificação supervisionada das bandas texturais pelos métodos de mínima distância para a média, STC e máxima verossimilhança	30
FOTO	3.1 - Campo de matações com vegetação pobre de cerrado, típica da área granítica .	36
FOTO	3.2 - Mapa Geológico simplificado da Suíte Intrusiva de Itu. Adaptado de Pascholati (1991)	41
FOTO	3.3 - Entrada da mina de wolframita de Inhandjara	45
FOTO	4.1 - Imagem do canal do urânio, interpolada pelo método de curvatura mínima	56
FOTO	4.2 - Imagem do canal do tório, interpolada pelo método de curvatura mínima	56
FOTO	4.3 - Imagem do canal do potássio, interpolada pelo método de curvatura mínima	57
FOTO	4.4 - Imagem do canal de contagem total, interpolada pelo método de curvatura mínima	57
FOTO	4.5 - Imagem do canal de urânio, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima	59
FOTO	4.6 - Imagem do canal de potássio, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima	59
FOTO	4.7 - Imagem do canal de contagem total, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima	60
FOTO	4.8 - Primeira Componente Principal das imagens aerogeofísicas	65
FOTO	4.9 - Segunda Componente Principal das imagens aerogeofísicas	66
FOTO	4.10 - Razão potássio/tório dos dados aerogeofísicos	67
FOTO	4.11 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com três categorias	68

FOTO	4.12 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com cinco categorias	69
FOTO	4.13 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com onze categorias	69
FOTO	4.14 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos	74
FOTO	4.15 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos	74
FOTO	4.16 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos	75
FOTO	4.17 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos	75
FOTO	4.18 - Diagrama previsional construído a partir dos dados aerogeofísicos	79
FOTO	4.19 - Diagrama previsional construído a partir dos dados geoquímicos	80
FOTO	4.20 - Diagrama previsional geral construído a partir dos dados geoquímicos e geofísicos	81
FOTO	5.1 - Principais lineamentos estruturais extraídos por foto-interpretação das imagens Landsat TM	85
FOTO	5.2 - Combinação RGB das bandas TM 321 ("cor real")	87
FOTO	5.3 - Combinação RGB das bandas TM 432 ("falsa cor")	88
FOTO	5.4 - Combinação RGB das bandas TM 354	90
FOTO	5.5 - Combinação RGB das bandas TM 754	90
FOTO	5.6 - Combinação RGB das bandas TM 472	91
FOTO	5.7 - Combinação RGB das bandas TM 372	92
FOTO	5.8 - Combinação RGB das bandas TM 572	92
FOTO	5.9 - Razão de bandas TM 4/3	94
FOTO	5.10 - Razão de bandas TM 3/1	94
FOTO	5.11 - Razão de bandas TM 5/7	95
FOTO	5.12 - Composição colorida RGB das razões de bandas 5/7, 4/3 e 3/1	96
FOTO	5.13 - Composição colorida RGB das componentes principais 135	98
FOTO	5.14 - Composição colorida RGB das componentes principais 254	99
FOTO	5.15 - Imagem composta pelo espaço HSI e reconvertida para o RGB, integrando os dados aerogeofísicos e as informações das bandas Landsat TM .	100

FOTO 5.16 - Detal da Su	he da foto anterior, com destaque para a porção norte íte (Granito Itupeva)	100
FOTO 5.17 - Class	ificação por maxver aplicada sobre as bandas Landsat TM originais	103
FOTO 5.18 - Mesn e as b	no algoritmo da foto anterior, considerando as bandas Landsat TM andas texturais	103
FOTO 5.19 - Class área d	ificação por maxver aplicada sobre as bandas originais, com uma le treinamento a partir do diagrama previsional composto	108
FOTO 5.20 - Mesn	no algoritmo anterior, incluindo as bandas texturais	108
FOTO 5.21 - Class treina	ificação por maxver sobre a imagem total, com uma área de mento sobre a ocorrência da Pedreira Tocantins	109

INDICE DE TABELAS

TABELA	3.1 - Análises químicas de um perfil lateral de alteração do granito Itupeva. Amostras coletadas na Pedreira Tocantins	48
TABELA	4.1 - Correlação entre dados terrestres e aéreos interpolados, em função do tamanho do pixel	61
TABELA	4.2 - Resumo de "acertos" dos diagramas previsionais, considerando-se as ocorrências citadas pelo IPT (1981)	82
TABELA	5.1 - Matriz de correlação entre as bandas da imagem Landsat TM	97
TABELA	5.2 - Auto-valores e auto-vetores da imagem Landsat TM	97
TABELA	5.3 - Índices de acerto calculados sobre as áreas de treinamento sobre as imagens radiométrica e composta	105
TABELA	5.4 -Índices de acerto calculados sobre as áreas de treinamento sobre as imagens radiométrica e composta, após a filtragem pelo algoritmo dos pixels mal classificados	106
TABELA	A.1 - Principais feições diagnósticas e bandas TM associadas	A2
TABELA	A.2 - Bandas TM, range espectral e principais aplicações	A5
TABELA	A.3 - Razões de bandas TM e suas aplicações	A11

1. INTRODUÇÃO

1.1.APRESENTAÇÃO DO TEMA

O processamento digital de imagens se consolida hoje como uma ferramenta bastante útil em serviços geológicos diversos, que vão desde as etapas iniciais de mapeamento regional e prospecção, até a delimitação de corpos mineralizados e zonas de alteração hidrotermal.

Não nos cabe aqui, portanto, uma avaliação do mérito deste instrumental, porém sim uma constante procura de seu entendimento e de seu aprimoramento, através da proposição de novas técnicas experimentais que venham a se somar às atualmente existentes, abrindo perspectivas para novas aplicações.

É exatamente neste sentido que se desenvolveu esta dissertação de mestrado, na qual uma feição normalmente negligenciada pelos sistemas tradicionais de processamento digital de imagens - a **textura** - é analisada e caracterizada por intermédio de variogramas, graças ao emprego de conceitos e procedimentos igualmente consagrados no campo da Geoestatística: as relações espaciais entre variáveis.

A união destes dois campos do conhecimento geológico intimamente ligados pelo uso de equipamentos e softwares cada vez é aqui realizada poderosos dentro de mais um contexto metalogenético, vez que dados geológicos, geofísicos uma е geoquímicos são integrados de maneira a estabelecer um modelo prospectivo, modelo este utilizado para a avaliação dos resultados de cada um dos métodos empregados.

Esta integração é feita com o auxílio de um Sistema Geográfico de Informações, fechando-se um ciclo com as principais tendências atuais dentro do campo da informatização e otimização das informações de caráter geológico.

Num âmbito tão geral e possivelmente presunçoso, esperase ter atingido um equilíbrio entre uma dissertação *generalista* em excesso, sem um adequado esclarecimento dos assuntos tratados, e

uma dissertação *especialista*, só compreendida pelos já "iniciados", ambos os extremos considerados perigosos e indesejados.

1.2.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação é iniciada com uma revisão dos principais conceitos empregados, tais como **textura** e **variograma**, assim como da evolução das propostas de utilização de variogramas em imagens de sensoriamento remoto. O capítulo 2 é encerrado com a proposição de uma nova metodologia para a análise textural de imagens pela união destes conceitos, utilizando-se para sua demonstração uma imagem sintética e uma imagem Landsat TM 7.

Admitiu-se *a priori* um conhecimento por parte do leitor dos conceitos básicos ligados ao sensoriamento remoto, como estrutura das imagens e principais técnicas empregadas em seu processamento digital, conhecimento este essencial para o entendimento de muitos aspectos relevantes levantados e discutidos no decorrer da dissertação.

Uma revisão completa deste assunto se desvia, a nosso ver, da proposição original do trabalho, porém em virtude de sua capital importância optou-se pela inclusão de um anexo onde é apresentada uma revisão das principais técnicas tradicionais de processamento digital de imagens discutidas na literatura, esclarecer seus princípios básicos procurando-se е fornecer julgamento pessoal elementos para um sobre as vantagens desvantagens de cada uma delas. Exemplos de aplicação encontrados literatura são sucintamente expostos, para na orientação bibliográfica.

A estrutura deste anexo é similar a todos os livros e apostilas encontradas sobre o assunto: os conceitos básicos são apresentados de forma o mais clara e simples possível, e a seguir as técnicas de processamento digital mais difundidas são analisadas em nível crescente de complexidade.

A área de estudo é apresentada no capítulo 3, onde são abordados todos os aspectos considerados mais importantes para o entendimento do modelo: clima, geomorfologia, cobertura vegetal, geologia regional, geologia local e aspectos metalogenéticos.

A determinação das áreas alvo com maior potencialidade mineral dentro da área de estudo é feita essencialmente pela análise de dados geofísicos e geoquímicos, tendo-se como suporte dados de mapas geológicos disponíveis. Estes dados, seu processamento e as áreas alvo deles resultantes são apresentados no capítulo 4.

Finalmente, no capítulo 5 é feita a aplicação das técnicas tradicionais de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, incluindo o novo algoritmo para a caracterização textural de imagens, procurando-se a correlação entre os resultados obtidos nas imagens e as áreas alvo definidas no capítulo anterior.

As conclusões e recomendações decorrentes de todo o trabalho são reunidas no capítulo 6, que procura resumir o avanço obtido e as dúvidas levantadas. Este capítulo encerra a dissertação, mas certamente não encerra o tema abordado, este bastante mais complexo que a modesta contribuição que ora se apresenta.

2. CARACTERIZAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS

2.1.INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver a utilização dos variogramas enquanto ferramenta para análise textural, sendo inicialmente feito um breve resumo dos conceitos básicos de textura e variograma e dos princípios utilizados pelos demais classificadores texturais estatísticos.

Os variogramas foram definidos como nosso objeto de estudo porque permitem englobar o aspecto estatístico (repetição de padrões e valores) e o estrutural (espacial), sendo ainda sensíveis ao aspecto de escala.

2.2.CONCEITOS BÁSICOS

Os procedimentos de classificação de imagens tradicionalmente empregados têm em comum sua natureza espectral, isto é, os valores de DN (*Digital Number*, ver anexo) para cada pixel e sua variação em cada banda são considerados de forma a isolar áreas homogêneas que possam posteriormente ser interpretadas.

Há, no entanto, outro conceito básico na fotointerpretação normalmente não considerado ou pouco caracterizado: **textura** ou **padrão textural**. O conceito de textura foi inicialmente utilizado de forma bastante qualitativa, empregando-se termos como "rugosa", "lisa", "isótropa", "fina" etc., a partir de exemplos visuais que permitissem uma padronização. Com o avanço da técnica e a utilização de processamentos digitais de imagens, no entanto, houve uma necessidade premente de quantificação deste conceito.

Lillesand & Kiefer (1979) definiram textura como sendo "a freqüência da variação tonal de uma imagem". Para Drury (1987), textura é "a freqüência de variação e o arranjo dos tons em uma imagem, freqüentemente utilizada para descrever a aparência conjunta de partes da superfície".

Rubin (1989), para efeitos de classificação textural de imagens, considera a textura como "a variabilidade espacial das

intensidades de tons dos pixels", e procura ainda individualizar os componentes de textura, isto é, os atributos básicos que definem um padrão textural:

* **Texel**: é a menor área que combina todos os elementos em uma textura distinta (*textural element*);

* **Contraste local:** é a diferença de brilho entre grupos de pixels. Áreas com alto contraste local possuem textura rugosa, enquanto que áreas com baixo contraste local possuem textura lisa;

* Escala, tamanho das áreas claras ou escuras: a individualização de áreas claras e escuras resulta em texturas grossas ou finas;

* Orientação preferencial: define a textura iso ou anisotrópica.

Neste trabalho, textura pode ser entendida como a relação espacial existente entre os valores de DN de uma imagem, sua distribuição e intensidade relativa. Há uma forte relação entre os conceitos de **textura** e **escala**, sendo a primeira função da segunda. Para melhor assimilação do conceito, tomemos um tabuleiro de xadrez onde os quadros brancos possuam listras verticais e os quadros negros possuam listras horizontais. Em uma escala maior, o padrão textural é caracterizado pela rede quadrada, e em uma escala menor pela seqüência de listras.

2.3.CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS

A carência de técnicas que permitissem a compreensão da natureza da variabilidade espacial observada nas imagens de sensoriamento remoto e de sua correlação com a variabilidade natural do terreno imageado levou diversas escolas e autores a proporem diferentes métodos de análise textural.

São historicamente reconhecidos dois grandes grupos de classificadores texturais: os "estruturais" e os "estatísticos". Os métodos estruturais consideram que a textura é definida pela repetição de um elemento estrutural primitivo dentro de uma certa regra espacial. Neste grupo podem ser incluídos os métodos de classificação textural por análise de Fourier e os de morfologia

matemática. Os métodos estatísticos procuram caracterizar a lei de distribuição espacial entre os valores de DN das imagens. Dentre estes podem ser destacados os métodos de matrizes de co-ocorrência, espectros texturais, filtros texturais e variogramas.

A nosso ver, a maior dificuldade encontrada com os classificadores estruturais é a definição da "unidade fundamental". A geometria desta unidade não necessariamente é simples, e provavelmente é distinta caso a caso. Uma fase inicial com testes a partir das figuras elementares torna o método pouco prático, e de qualquer modo esta "unidade fundamental" poderia ser igualmente caracterizada a partir dos métodos estatísticos, razão pela qual optou-se por esta linha de estudo.

2.3.1. Filtros Texturais

Os filtros texturais propostos por Rubin (1989) funcionam exatamente igual aos utilizados no processamento digital de imagens para o realce de bordas, porém aqui o objetivo é substituir o valor do pixel central por um valor representativo da textura interna à área coberta pelo filtro. A vantagem deste tipo de método é que os valores obtidos podem ser representados sob a forma de uma nova imagem, correspondente à classificação textural da imagem original, sendo esta característica aproveitada por praticamente todos os métodos texturais mais complexos.

O primeiro valor sugerido é o desvio padrão entre os pixels internos ao filtro: texturas rugosas (alto contraste) terão desvio padrão maior, e portanto serão representadas por pixels mais claros na imagem final. Este valor não é, porém, sensível às propriedades de escala (textura grossa ou fina) e anisotropia da imagem.

Uma segunda sugestão foi a utilização do "valor absoluto", definido como o somatório das diferenças absolutas entre os pixels vizinhos internos ao filtro:

```
Seja o filtro 3 x 3: | A B C |
| D E F |
| G H I |
```

Texturas rugosas serão representadas por pixels claros, e texturas lisas por pixels escuros na imagem final. Da mesma forma que o filtro por desvio padrão, o por valor absoluto mostra-se pouco sensível à escala e à anisotropia, a não ser quando consideramos janelas de dimensões distintas.

Quando aplicados em janelas pequenas, estes filtros tornam-se detectores de bordas.

2.3.2. Matrizes de Co-ocorrência

As matrizes de dependência espacial ou co-ocorrência foram propostas por Haralick *et al.* (1973) como um procedimento estatístico para a caracterização de padrões texturais em imagens com formato matricial.

Para um dado pixel, é definida sua vizinhança como constituída pelos oito pixels a ele adjacentes, num formato de matriz 3 x 3. Admite-se que a informação textural total da imagem pode ser tirada de uma matriz de frequências relativas P_{ij} referentes à repetição de um par de valores separados por uma distância **d** e um ângulo .

A Figura 2.1 exemplifica o procedimento de construção das matrizes de co-ocorrência.

A partir destas matrizes, Haralick *et al.* (1973) propuseram 14 diferentes funções matemáticas relacionadas de forma mais ou menos direta com características texturais da imagem original. Algumas destas funções são de fácil compreensão, como é o caso do segundo momento angular (ASM), contraste e grau de correlação, porém outras apresentam-se de forma inicialmente um tanto abstrata e mereceriam melhor discussão.

As feições texturais calculadas a partir de matrizes de co-ocorrência foram aplicadas por Haralick *et al.* (1973) para a classificação supervisionada de uma imagem MSS, em conjunto com os dados de média e desvio padrão dos valores de DN para cada classe.

O índice de acertos médio obtido foi de 83.5 %, contra apenas 74 a 77 % através de um método puramente espectral.



Figura 2.1 : Construção das matrizes de co-ocorrência (indicadas em b) a partir de uma imagem 4 x 4 (imagem a) para as direções de 0° (c), 90° (d), 135° (e) e 45° (f). Extraído de Haralick et al. (1973).

Sendo as matrizes uma função da distância e do ângulo considerados, a sugestão dos autores é a utilização dos valores de média e *range* da feição espectral, calculada em ao menos quatro direções distintas, como *ínput* de um algoritmo de classificação.

Franklin & Peddle (1987) apresentaram um programa em linguagem C para a caracterização textural de imagens, baseado em três das funções propostas por Haralick *et al.* (1973). Uma característica importante deste programa é sua divisão em módulos, de forma que outras funções podem ser adicionadas sem profundas alterações no programa principal.

Cogo (1993) utiliza também funções propostas por Haralick *et al.* (1973) para a geração de imagens às quais denomina de **canais texturais**. As componentes principais dos canais texturais são utilizadas em conjunto com as componentes principais das bandas TM originais em uma classificação por máxima verossimilhança. O nível de exatidão obtido com a inclusão dos canais texturais sofreu um incremento de 70 para 80 %, para a imagem teste utilizada na separação de domínios de vegetação.

2.3.3. Espectros Texturais

Wang & He (1990) e He & Wang (1990) apresentaram como alternativa às matrizes de co-ocorrência um novo método estatístico de classificação textural, baseado na freqüência de "unidades texturais" dentro de uma imagem. Estas "unidades texturais" correspondem à informação textural local representada por uma máscara quadrada de 9 pixels, a qual pode ser considerada a menor unidade completa possível, pois inclui a informação em oito direções.

A combinação das relações entre estes 9 valores leva a 6561 unidades texturais possíveis numa imagem genérica, e a freqüência destas unidades na imagem, representada sob a forma de gráficos tipo histograma, define o "espectro textural". Estes serão então utilizados na classificação das imagens originais.

2.4. VARIOGRAMAS E SUA APLICAÇÃO EM IMAGENS

O conceito de variáveis regionalizadas foi apresentado por Matheron (1963), servindo como base para o desenvolvimento da teoria da geoestatística. Segundo este autor, uma variável regionalizada é uma variável cujos valores não são totalmente aleatórios, mas estão ligados entre si de acordo com uma regra de distribuição espacial.

Em termos simplificados, a geoestatística considera que as variáveis geológicas de uma área podem ser caracterizadas como variáveis regionalizadas, estando portanto sujeitas a leis de distribuição espacial passíveis de serem modeladas dentro de limites de erro conhecidos. Uma característica extremamente importante é a de que os métodos puramente estatísticos de estudo destas variáveis não são capazes de traduzir com boa aproximação o comportamento de uma determinada população, pois não consideram sua

distribuição espacial e não fornecem dados referentes à continuidade, periodicidade e anisotropia.

O variograma pode ser definido como uma função geoestatística, geralmente representada na forma de gráficos lineares, que mede a variância (dispersão) de um determinado atributo em função de um espaço e direção amostral. Reflete, portanto, a dependência espacial de cada ponto com seus vizinhos, e quantifica os conceitos de "raio de influência", "anisotropia" e "efeito pepita".

Sendo o variograma uma função simétrica no espaço, para efeitos de cálculo e representação utiliza-se via de regra o semivariograma, mantendo-se no entanto como "jargão" o nome original da função. Esta mesma simplificação de linguagem será utilizada neste trabalho.

A Figura 2.2 mostra as características básicas de um semivariograma padrão (daqui em diante denominado simplesmente de variograma). O comportamento da curva próximo à origem, a intersecção com o eixo das ordenadas, os níveis de estabilização da função definem os diversos modelos matemáticos utilizados via de regra para processos geoestatísticos de estimação, como a *krigagem* e a *co-krigagem* (estes métodos exigem uma discussão muito mais profunda de geoestatística e não serão aqui abordados.).



Figura 2.2: Modelo teórico simples de um variograma de modelo esférico Var: valor da função variograma h: espaçamento ou passo a: alcance ou range Co: efeito pepita C: variância amostral C + Co: patamar ou *sill* (variância local)

Cada ponto no variograma reflete a dispersão (variância) média entre todos os pontos com um espaçamento \mathbf{h} entre si, na direção considerada, em relação à primeira bissetriz do correlograma (onde Z(\mathbf{x}) = Z(\mathbf{x} + \mathbf{h})).

Esta relação pode ser facilmente tirada a partir da Figura 2.3, que é justamente o correlograma entre $Z(\mathbf{x})$ e $Z(\mathbf{x}+\mathbf{h})$.

Nela, observamos uma nuvem de pontos em torno da diagonal principal. Para calcularmos a distância que separa um determinado ponto i desta diagonal, teremos:

sen $45^{\circ} = d_i / [Z(x+h) - Z(x)]$



Figura 2.3 : Correlograma entre $Z(\mathbf{x}) \in Z(\mathbf{x}+h)$.

O cálculo da variância é feito a partir do quadrado das distâncias, de forma que os valores sejam sempre positivos:

 $d_i^2 = 1/2 * [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2$

Para N pontos, teremos a variância média pelo somatório das distâncias individuais:

 $Var = 1/2N * Som_{i} [Z(\mathbf{x_{i}}+\mathbf{h}) - Z(\mathbf{x_{i}})]^{2}$,

A fórmula final apresentada é justamente a definição básica da função semivariograma.

Em modelos mais complexos, estruturas sobrepostas no espaço poderão ser refletidas por variogramas imbricados, nos quais mais de um patamar pode ser observado. Este fenômeno é bastante comum em casos onde há variação (ou mesmo repetição) de estruturas em escala distintas: o primeiro patamar reflete a escala menor, e diante. O próprio valor de efeito pepita pode ser assim por considerado uma estrutura sobreposta escala inferior em à amostrada.

A Figura 2.4 ilustra um caso hipotético onde um corpo de minério lenticular de 200 metros de extensão pode ser subdividido internamente em lentes menores imbricadas com 50 metros cada. O primeiro patamar reflete a estrutura menor, interna, e o segundo patamar a estrutura maior. O efeito pepita seria ainda uma terceira estrutura, em escala menor que a amostrada, com uma variabilidade inerente não caracterizada.



Figura 2.4 : Variograma experimental hipotético com estruturas imbricadas. O efeito pepita representa uma variabilidade em escala inferior à amostrada, o primeiro patamar corresponde às lentes internas de 50 metros e o segundo patamar à estrutura maior do corpo de minério.

Curran (1987 e 1988) argumenta que a superfície da Terra e as imagens dela resultantes têm propriedades espaciais distintas, e que uma vez quantificadas estas propriedades podem ter muitas aplicações em sensoriamento remoto, destacando-se as classificações das imagens e o planejamento das densidades de amostragem. As técnicas para quantificação destas propriedades espaciais aplicadas via de regra, como os correlogramas e as transformações de Fourier, não seriam, segundo este autor, ideais para o estudo de fenômenos geológicos contínuos ou de variabilidade ilimitada, apresentando-se o variograma como importante ferramenta para o estudo destes fenômenos.

Curran (*op. cit.*) apresenta ainda alguns tipos de variogramas relativos a diversas áreas de cobertura distinta, procurando reconhecer nestes estruturas primárias que permitissem sua catalogação e arranjo em modelos mais complexos.

O "germe" da classificação textural por variogramas foi portanto lançado, porém a preocupação com o ajuste a modelos matemáticos constituía-se ainda em um problema de difícil solução.

Woodcock et al. (1988a,b) demonstram que os variogramas obtidos através de imagens de sensoriamento remoto, onde os tons de cinza são tratados como variáveis regionalizadas, possuem boa correlação com as variáveis do terreno imageado, ainda que os variogramas obtidos entre uns e outros não sejam os mesmos.

Rubin (1989) demonstra matematicamente, de maneira simples, a aplicabilidade de variogramas em imagens de sensoriamento remoto, partindo do conceito de contraste. Como resultados desta aplicação, conclui que o valor do *patamar* corresponde ao contraste local, e o tamanho das áreas claras e escuras é dado pela amplitude no variograma.

Carr & Myers (1984) propõem a utilização da teoria das variáveis regionalizadas em imagens Landsat, com a análise variográfica feita banda a banda, partindo da hipótese de que a variabilidade espacial do espectro solar refletido é função da banda. Como importante campo para a utilização da técnica, os autores apontam a filtragem espacial e o registro de imagens

(correlação, sobreposição e interpolação em imagens de baixa resolução).

Estas propostas são desenvolvidas por Glass et al. (1988), que se utilizam do conceito de correlação espacial entre imagens para a reconstituição de uma imagem Landsat, degenerada por subamostragem, a partir de outra de banda adjacente. Foi demonstrado que o processo de correlação espacial, análise variográfica e *co-krigagem* gera uma imagem "regenerada" de qualidade muito superior aos processos de interpolação, porém há ainda uma perda de foco.

A perda de foco observada é facilmente entendida quando se recorda que o método de estimação por *krigagem* ou *co-krigagem* tem por característica essencial a minimização da variância de estimação, sendo o resultado final um resultado médio entre todos os possíveis para uma mesma estrutura variográfica. Conceitualmente, estaríamos portanto relacionados a um filtro do tipo de "passa baixas".

Experimentos semelhantes foram realizados por MacDonald & Carr (1989) a partir de uma imagem Landsat, porém com a utilização de variogramas imbricados com dois patamares. Os autores concluem que o valor do primeiro *range* é constante para todas as bandas modeladas, e o valor do segundo *range* é dependente do sistema (de forma que são iguais para as bandas 1 a 4, e para as bandas 5 e 7). Este imbricamento revelado pelos variogramas é devido à sobreposição de duas estruturas, as quais são devidas a dois fenômenos distintos. O primeiro *range*, comum a todas as bandas, contém provavelmente a informação referente à área imageada, e o segundo poderia ser imposto pelas características do sistema sensor ou refletir uma estrutura só captada pelas bandas 5 e 7.

2.5. CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DE IMAGENS POR VARIOGRAMAS

2.5.1. Princípios básicos utilizados

O princípio básico aplicado pelos classificadores texturais por variogramas é o de que estes gráficos refletem a textura de uma imagem, caracterizando-a e diferenciando-a de outras texturas. É extremamente importante aqui o entendimento da íntima relação existente entre textura e escala, a qual em última análise corresponde ao suporte de amostragem para a construção do variograma.

Para a demonstração deste princípio, foi gerada uma imagem sintética binária quadriculada com diferentes texturas internas a cada célula, havendo a repetição aleatória de texturas e a rotação destas em relação ao centro da célula (Foto 2.1).



Foto 2.1 : Imagem textural sintética, formada pela repetição de dez
padrões distintos.

A imagem gerada possui assim um total de 30 células de mesmas dimensões distribuídas em 5 linhas e 6 colunas, correspondentes à repetição de 10 padrões texturais, conforme indicados no esquema abaixo:

A B		DI	EIF
ATTET	[FT	ĀT	-C-T_G
<u>G</u> TT <u>C</u> T	BT	H_T	TTTF
HIA	GT	ĒT	BTT-C
D T F	[-]]-].	-C-T	ATTH

A análise dos variogramas construídos sobre esta imagem deve permitir o reconhecimento de todas as características essenciais de cada padrão textural, caracterizando-o e distinguindo-o dos demais. Estas características essenciais serão representadas sob a forma de periodicidade, patamares, imbricamento de estruturas, etc, e sua relação geométrica com o padrão textural correspondente será abaixo discutida.

Tomemos como primeiro exemplo os variogramas para a textura A, com uma área de treinamento na primeira quadrícula da imagem. Esta textura é constituída por linhas brancas horizontais com largura de 1 pixel separadas por listras de 6 pixels pretos.

O variograma para a direção horizontal (Figura 2.5.a) mostra a extrema continuidade nesta direção, o variograma para a direção 90° (Figura 2.5.c) mostra uma periodicidade a cada 7 pixels (representada pelas linhas brancas) e os variogramas para as direções 45 e 135° (Figuras 2.5.b e 2.5.d) são praticamente iguais e mostram uma periodicidade de 10 pixels (correspondente mais uma vez às linhas brancas).

A textura C é caracterizada por um reticulado formado por listras horizontais brancas e pretas de 1 ou 2 pixels e listras brancas verticais de um pixel separadas por listras pretas de 6 ou 7 pixels.

O variograma horizontal (Figura 2.6.a) reflete a repetição de duas unidades, uma com tamanho médio de 6 a 7 pixels (as listras pretas) e outra com um pixel (linhas brancas). Na direção vertical (Figura 2.6.c), cada unidade de repetição possui 1 a 2 pixels (o que é marcado pela alta freqüência das feições no

variograma), porém uma estrutura maior de 5 pixels é indicada pelo "buraco" mais pronunciado.

Esta estrutura de 5 pixels corresponde a uma sucessão de dois conjuntos de pixels brancos e pretos dispostos de maneira distinta, a qual pode realmente ser verificada na imagem numa análise de detalhe. Os variogramas para 45 e 135° (Figuras 2.6.b e 2.6.d) não são exatamente iguais, demonstrando que não se trata de uma textura perfeitamente isótropa, e o variograma médio (Figura 2.6.e) fornece uma assinatura textural média.



Figura 2.5 : Variogramas construídos para a textura A, com uma janela móvel de 50 x 50 pixels. A partir do canto superior esquerdo, para a direita e para baixo: (a) horizontal (0°), (b) diagonal 45°, (c) vertical (90°), (d) diagonal 135° e (e) variograma médio (omndirecional).



Figura 2.6 : Variogramas construídos para a textura C, com uma janela móvel de 50 x 50 pixels. A partir do canto superior esquerdo, para a direita e para baixo: (a) horizontal (0°), (b) diagonal 45°, (c) vertical (90°), (d) diagonal 135° e (e) variograma médio (omndirecional).

Os variogramas da classe F (Figura 2.7) são distintos dos anteriores, sendo a periodicidade no variograma médio marcada pela distância de 12 pixels. Note a relação de escala refletida pelos variogramas em relação à textura B (Figura 2.8) : ambas são constituídas por pontos igualmente distribuídos, porém o espaçamento entre estes pontos é bem maior na classe F. A alta densidade de pontos da textura B é marcada pela alta frequência do espectro do variograma.





Figura 2.7 : Variogramas construídos para a textura F, com uma janela móvel de 50 x 50 pixels. A partir do canto superior esquerdo, para a direita e para baixo: (a) horizontal (0°), (b) diagonal 45°, (c) vertical (90°), (d) diagonal 135° e (e) variograma médio (omndirecional).

Em resumo, fica demonstrado a partir de uma imagem sintética que os variogramas são sensíveis a todos os nuances de textura, inclusive à escala considerada, e como tal apresentam grande potencial para sua utilização como parâmetros para uma caracterização textural.

Uma observação importante é a de que esta classificação não está necessariamente condicionada a um modelamento matemático dos variogramas experimentais, o que acrescentaria um fator subjetivo considerável, mas sim ao reconhecimento das principais feições que caraterizem estes variogramas.

A comparação destas feições, por vezes realçadas, é a chave do algoritmo proposto a seguir.


Figura 2.8 : Variogramas construídos para a textura B, com uma janela móvel de 50 x 50 pixels. A partir do canto superior esquerdo, para a direita e para baixo: (a) horizontal (0°), (b) diagonal 45°, (c) vertical (90°), (d) diagonal 135° e (e) variograma médio (omndirecional).

2.5.2. Processo de classificação: comparação de variogramas

Uma vez mostrada a aplicabilidade dos variogramas para a classificação textural de imagens sintéticas, fica bastante imediata uma idéia simples de algoritmo para classificação supervisionada.

Neste algoritmo, a primeira questão a ser entendida se refere às dimensões das áreas de treinamento e das janelas móveis. Uma vez que o conceito de textura está condicionado à escala, como definir uma área de treinamento de dimensões adequadas ?

A solução será sempre contextual, não havendo *a priori* uma resposta universal. O usuário deve identificar as dimensões da área alvo de pesquisa (a qual pode ser inferida a partir de informações geológicas, processamento de dados geofísicos e/ou geoquímicos, etc.), para uma primeira aproximação. Esta primeira área deve ser o maior possível, mantendose a homogeneidade da textura. Sobre esta área podem ser então construídos os variogramas iniciais, que refletirão a estrutura presente. Com base nestes variogramas é possível identificar as dimensões ótimas para a caracterização da textura, as quais serão também as dimensões ótimas para a nova área de treinamento e para as janelas móveis de classificação.

É muito importante que as janelas móveis tenham as mesmas dimensões das áreas de treinamento, por uma questão de suporte e escala já apresentada anteriormente. Esta aparente limitação, no entanto, possibilita a utilização de um número distinto de áreas de treinamento para uma mesma categoria, sem comprometimento do algoritmo.

A segunda questão crucial é: como comparar dois variogramas de caráter textural ?

Num ajuste de modelos clássico de variogramas a dados experimentais dá-se um valor maior aos pontos mais próximos à origem do gráfico, pois estes refletem as propriedades mais locais da variável estudada e são calculados com um número maior de pares de pontos (os quais obviamente decrescem em número com o aumento da distância de separação entre eles, dentro de uma janela retangular de dimensões fixas).

Para a caracterização textural, no entanto, o gráfico assume uma conotação de *assinatura espectral*, de forma que todos os seus pontos têm um significado próprio que não está necessariamente ligado ao número de pares utilizados para o cálculo da função. Em especial os valores correspondentes às feições de patamares, "efeitos buraco", periodicidade, etc., são definidores de padrão textural, e podem ser utilizados preferencialmente para sua distinção.

Num procedimento padrão bidimensional, a comparação entre dois ou mais variogramas poderia ser feita através do cálculo dos desvios médios acumulativos entre os pontos, conforme ilustra a Figura 2.9.



Figura 2.9 : Representação de dois variogramas até o passo 3. A comparação dos gráficos no espaço bidimensional pode ser feita pelo cálculo da distância média (ponderada ou não) entre os pontos para um mesmo passo.

Neste caso, no entanto, não é evidente o sistema de pesos a serem atribuídos aos pontos em função de seu distanciamento à origem do gráfico ou de sua natureza característica da textura considerada (conforme visto no ítem anterior).

Em uma representação gráfica um pouco distinta, poderíamos definir um espaço de **n** dimensões onde os eixos ortogonais são relativos aos valores dos variogramas calculados para **n** passos, conforme ilustra a Figura 2.10, para o espaço tridimensional.

Nesta nova representação, cada gráfico bidimensional ser representado por apenas um ponto passa а no espaço multidimensional. A adição de um intervalo de confiança em torno de cada ponto no variograma bidimensional é refletida no espaço multidimensional por paralelepípedos complexos que podem ser entendidos como nuvens de pontos. O processo de classificação deve apenas considerar a proximidade de pontos experimentais em relação a cada uma das nuvens relativas a áreas de treinamento, dentro de limites de confiança definidos pelo usuário.



Figura 2.10 : Representação dos mesmos variogramas da figura anterior, no espaço tridimensional. Os eixos correspondem aos valores dos variogramas calculados para cada um dos passos. As duas curvas são agora representadas como pontos no espaço, facilitando a comparação de texturas.

Esta comparação é feita já de forma usual nos sistemas de processamento digital de imagens, através de métodos como os de paralelepípedos, mínima distância para a média e máxima verossimilhança (todos expostos sucintamente no Anexo 1).

2.5.3. Algoritmos para a classificação textural por variogramas

Um primeiro algoritmo para a classificação de imagens de sensoriamento remoto baseado em variogramas foi proposto por MacDonald *et al.*(1990). Basicamente, trata-se de um classificador do tipo paralelepípedo com distância mínima para a média que permite a utilização de dados radiométricos (valores de DN) e texturais (variogramas).

No método proposto, o usuário deve selecionar na imagem áreas de treinamento quadradas com dimensões grandes o bastante para a correta determinação da textura alvo. Em cada uma destas áreas uma janela móvel de dimensões ímpares (de forma a assegurar a clara determinação do pixel central) será utilizada para o cálculo dos variogramas omndirecionais. O espaço multidimensional definidor das classes será então determinado pelos eixos referentes aos valores dos variogramas para cada passo utilizado, além de opcionalmente incluir os eixos dos valores da média e desvio padrão dos níveis de cinza.

Na etapa de classificação, uma janela móvel de mesmas dimensões que a utilizada no interior das áreas de treinamento percorre a imagem, comparando os valores obtidos ao espaço multidimensional conforme acima exposto e atribuindo ao pixel central o valor da classe correspondente, através da mínima distância para a média. Um fator multiplicador sobre os desvios padrões de cada classe estabelece os limites máximos para a classificação de um pixel. O incremento deste fator diminui o número de pixels não classificados.

Miranda (1990) utiliza o mesmo método, ao qual se refere como STC ("Semivariogram Textural Classifier"), em imagem de Radar uma área do Escudo das Guianas, objetivando SIR-B de 0 reconhecimento de padrões de cobertura vegetal e drenagem, obtendo resultados considerados bastante positivos. Neste trabalho, são utilizadas áreas de treinamento de 22 x 22 pixels, com janelas móveis de 7 x 7 e fator de multiplicação para as bordas de classes iqual a 2.

A proposta apresenta muitas características interessantes, porém há ainda algumas dificuldades operacionais não resolvidas, sendo a principal delas a não discussão das dimensões das áreas de treinamento e das janelas móveis, além da

impossibilidade de seleção dos passos a serem considerados no processo de classificação.

Como aprimoramento deste algoritmo foi escrito no desenvolvimento deste trabalho, em linguagem C e compilado em estações de trabalho Sun em ambiente UNIX, um programa denominado de **classtex**, o qual possibilita a geração de *bandas texturais* no sentido empregado por Cogo (1993) a partir dos valores dos variogramas relativos a cada distância entre pares **h**.

Este programa tem estrutura modular, permitindo a inclusão e alteração de funções sem o comprometimento do algoritmo principal. Trata-se em verdade de uma compilação e ajuste de rotinas e programas propostos em literatura e aplicados nos mais diversos campos, aqui reunidos com o objetivo de uma caracterização textural.

O tipo de variograma a ser calculado pode ser definido pelo usuário entre algumas das opções presentes no GSLIB (Geostatistical Software Library), não cabendo aqui uma discussão de cada um dos modelos propostos. Vale apenas a ressalva de que o tradicional, tal como variância variograma а estatística "clássica", é dependente não apenas dos aspectos texturais envolvidos, mas também dos valores de DN considerados no cálculo.

Uma opção apresentada pelo programa é a normalização do variograma pela variância da janela móvel, o que permite o emprego dos modelos tradicionais com a exclusão da componente radiométrica.

Α partir daí, janela móvel de uma dimensões deslocamentos estipulados pelo usuário percorre а imagem, calculando a função e atribuindo o valor obtido ao pixel central da janela considerada, conforme o princípio dos filtros texturais anteriormente expostos. A nova imagem gerada pode portanto ser entendida como uma banda textural, com a ressalva de que em virtude do variograma selecionado uma componente radiométrica pode ainda estar presente.

O número de bandas texturais geradas pode ainda ser definida pelo usuário: dada uma janela com dimensões 10 x 10, por exemplo, podem-se gerar imagens referentes a variogramas com passos

entre um e nove, cada uma correspondendo a uma banda textural diferente, ainda que a informação referente às bandas de menor ordem esteja inerente às de maior ordem.

A combinação das bandas texturais mais características (conforme identificadas pela análise dos variogramas) com as bandas radiométricas (ou com componentes principais) deve levar a uma classificação da imagem muito mais precisa, possibilitando ainda a prospecção de áreas com características (radiométricas e/ou texturais) previamente conhecidas.

2.5.4. Estudo de caso: comparação com o STC

2.5.4.1.Imagem Sintética

A definição das dimensões para a janela móvel na imagem quadriculada sintética anteriormente apresentada (Foto 2.1) é relativamente simples, uma vez que as células são todas de tamanho constante e possuem texturas internas ditas homogêneas.

Como exemplo, foram utilizadas janelas 10 x 10, gerandose bandas texturais para passos entre 1 e 9. A combinação RGB de três destas bandas irá realçar uma ou outra textura, porém em todos os casos para uma mesma textura uma mesma cor resultante será sempre atribuída, conforme ilustrado pelas Fotos 2.2 a 2.4 . A combinação que melhor permite a individualização de todos padrões texturais foi a de passos 1, 3 e 7 (Foto 2.4).

Como ajuste final, um filtro "passa baixas" tipo medianas foi utilizado, obtendo-se como resultado a imagem da Foto 2.5 .



Foto 2.2 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 1, 3 e 9, calculados em janela móvel de 10 x 10 sobre a imagem sintética.



Foto 2.3 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 2, 4 e 9, calculados em janela móvel de 10 x 10 sobre a imagem sintética.



Foto 2.4 - Combinação das bandas texturais referentes aos passos 1, 3 e 7 calculados em janela móvel de 10 x 10 sobre a imagem sintética.



Foto 2.5 - Imagem resultante de um filtro de medianas 9 x 9 aplicado sobre a imagem da Foto 2.4.

2.5.4.2.Imagem Landsat

Outro teste foi realizado com uma imagem Landsat banda TM 7, com 480 x 480 *pixels*. Nesta, admitiu-se como área alvo a área urbana, com uma textura bem marcante, e o variograma inicial foi construído em uma janela de 15 x 15 *pixels*, conforme ilustra a Figura 2.11 . A partir deste variograma constatou-se que a textura é bem definida até o passo 5, sendo então definida uma janela móvel de dimensões 6 x 6 *pixels*, gerando cinco bandas texturais.



Figura 2.11 - Variogramas da área urbana de uma imagem Landsat TM 7, para uma janela de 15 x 15 pixels.

O tipo de variograma selecionado foi o tradicional, e as bandas texturais foram utilizadas como entrada para uma classificação supervisionada por mínima distância para a média, para comparação com os resultados obtidos pelo STC de Miranda (1990).

Na Foto 2.6.a a imagem Landsat TM banda 7, com realce de contraste, mostra a área urbana do município de Indaiatuba em pixels claros, confundindo-se em parte com porções da Bacia ocupadas pela atividade agrícola. A vegetação e a rede hidrográfica aparecem em tons escuros.



Foto 2.6 -Classificação supervisionada das bandas texturais pelos métodos de mínima distância para a média, STC e máxima verossimilhança. Em (f), imagem resultante de um filtro de mediana sobre a classificada por máxima verossimilhança.

A Foto 2.6.b é o resultado da classificação textural pelo STC, bastante semelhante ao obtido pelo algoritmo aqui apresentado para uma classificação textural por mínima distância para a média (Foto 2.6.d), utilizando-se os cinco canais texturais obtidos a partir da imagem TM original . Esta semelhança é indicativa da equivalência dos dois procedimentos, havendo no algoritmo proposto a viabilidade de utilização de um número distinto de canais texturais, além de outros algoritmos de classificação supervisionada, como o de paralelepípedos (Foto 2.6.c) e o de máxima verossimilhança (Foto 2.6.e).

Em ambos os casos, é ainda admitida a inclusão dos dados radiométricos (valores de DN para cada área de treinamento).

Como processamento final, uma filtragem do tipo "passa baixas" foi aplicada sobre o resultado da classificação por máxima verossimilhança, sendo a imagem final apresentada na Foto 2.6.f, onde a área urbana referente ao município de Indaiatuba é bem delimitada.

Pode-se concluir a partir deste exemplo que o método de classificação textural é eficiente em casos de texturas bem características, como é o caso de imagens sintéticas e áreas urbanas. Porém estas mesmas áreas poderiam ser eficientemente individualizadas com uma análise visual expedita, o que pode não comprometer a eficiência do algoritmo proposto, mas põe em cheque sua utilidade. Vale-nos lembrar, por outro lado, que pequenas diferenças texturais não claramente separadas pelo olho humano serão plenamente distintas pela análise numérica da imagem, da mesma forma que ocorre com as variações tonais.

Dentre as maiores dificuldades que possam ser encontradas na aplicação do método, acreditamos serem as principais aquelas arroladas a seguir:

- determinação da banda original mais indicada para a obtenção dos canais texturais (ou grupo de bandas, componentes principais, razões, etc.);

 determinação da janela inicial para a construção dos variogramas, que em última análise indicarão o número de passos a serem considerados no processo de classificação;

 interpretação dos variogramas e seleção dos passos característicos para cada alvo textural;

Estas questões e outras que certamente surgirão somente testes mais rigorosos que serão esgotadas após devem ser implementados em casos mais complexos, com texturas naturais e a partir de diferentes bandas das imagens Landsat, para uma catalogação dos resultados. É necessária a obtenção de uma "cultura" de análise textural por variogramas, da mesma forma que se obteve uma "cultura" sobre a caracterização do comportamento espectral dos alvos minerais.

Uma primeira tentativa de sua aplicação é apresentada no capítulo 5 desta dissertação, onde as características texturais são utilizadas em adição aos métodos tradicionais de processamento digital de imagens para a classificação supervisionada por máxima verossimilhança das imagens Landsat correspondentes à área da Suíte Intrusiva de Itu (SP).

3. APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.INTRODUÇÃO

Este capítulo tem como objetivo a apresentação da área da Suíte Intrusiva de Itu, discorrendo sobre seus principais aspectos em relação à fisiografia e geologia. Informações mais detalhadas poderão ser encontradas na bibliografia citada, procurando-se aqui a restrição às informações mais relevantes ao entendimento global do texto.

3.2. LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área em estudo está localizada a aproximadamente 70 Km a noroeste da cidade de São Paulo, sendo delimitada pelos meridianos 23° e 23°20'S e paralelos 47° e 47°20' W, conforme ilustra a Figura 3.1.



Figura 3.1 - Mapa de localização da Suíte Itu. Extraído de Galembeck (1991).

Para a análise das imagens Landsat foi selecionada uma área quadrada correspondente a 1024 x 1024 *pixels* de 30 metros de lado, totalizando cerca de 940 Km². Esta área é abrangida por quatro folhas topográficas 1:50.000 do IBGE: Salto (SF-23-Y-C-II-1), Indaiatuba (SF-23-Y-C-II-2), Itu (SF-23-Y-C-II-3) e Cabreúva (SF-23-Y-C-II-4).

O acesso é facilmente feito pelas rodovias Anhanguera (SP-330) e dos Bandeirantes (SP-348), além de uma densa rede de estradas secundárias e vicinais, em boa parte pavimentadas.

3.3. ASPECTOS FISIOGRÁFICOS

3.3.1. Clima

O clima é do tipo Temperado Moderado Chuvoso, com temperaturas médias anuais de 18 a 22 °C. Na estação seca, entre abril e setembro, a pluviosidade oscila entre 260 e 320 mm, e na estação chuvosa estes valores vão de 830 a 1100 mm (Hirata *et al.*, 1991).

3.3.2. Geomorfologia

A área está inserida na denominada Serrania de São Roque, conforme definida pelo mapa geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981). Nesta unidade, três formas de relevo estão representadas, sendo sucintamente caracterizadas por Hirata *et al*. (1991):

- Colinas graníticas: predominam na área do granito Salto, correspondendo a colinas médias de topos amplos е subnivelados, ocupando altitudes entre 540 e 700 metros. As vertentes são convexas e de baixa declividade, com grande número de matacões. А densidade de drenagem é baixa, COM padrão subdendrítico;

- Morrotes Graníticos: predominam na área central da Suíte Intrusiva, correspondendo a morrotes de topos amplos e convexos ocupando altitudes entre 700 e 850 metros, de vertentes convexas curtas, íngremes e com campos de matacões. A densidade de drenagem é média a baixa, com padrão subparalelo a subdendrítico;

- Colinas de Cimeira: ocorrendo no interior da Suíte e na sua porção leste, incluindo áreas do Complexo Itapira, esta unidade corresponde a colinas médias e pequenas de topos estreitos, de vertentes convexas longas, ocupando altitudes entre 720 e 920 metros. Os vales são abertos e bem marcados, e a densidade de drenagem é baixa com padrão subdendrítico.

O relevo de Colinas de Cimeira representaria um remanescente de fase de pediplanação. Processos erosivos instalados após a transição de clima tropical úmido para seco seriam responsáveis pelo dissecamento das áreas de solo profundo e exposição dos matacões, gerando assim o relevo de Morrotes Graníticos.

3.3.3. Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal na área do granito é escassa, havendo campos de matacões expostos e predomínio de vegetação de cerrado, típica de solos pobres (Foto 3.1). Nas áreas de talude há formação de material coluvionar mesmo sobre o granito, onde então pode se desenvolver uma cobertura vegetal mais espessa. Nas áreas úmidas e margens dos rios a mata ciliar é bem marcada nas imagens de satélite.

3.3.4. Hidrografia

O Rio Tietê cruza a área em sua porção meridional, correndo de SE para NW e passando pelas proximidades de Cabreúva e entre Salto e Itu. Outro importante rio é o Jundiaí, que corre de E para W passando entre Itupeva e Indaiatuba, sofrendo inflexão para sul até Salto e desaguando no Tietê. Inúmeras drenagens menores possuem seu curso adaptado às feições estruturais presentes. Dentre estas, merecem destaque o Ribeirão da Grama, o Ribeirão Piraí e os Córregos do Valério, da Fonte e de Santa Rita.

3.3.5. Ocupação

A ocupação antrópica é um fator importante a ser considerado, devido à proximidade da área a importantes centros urbanos, como é o caso de Indaiatuba, Salto e Itu, além de Itupeva e Cabreúva, menores. Há um grande número de propriedades rurais, e

as porções livres dos matacões são assim bastante aproveitadas para plantações (principalmente culturas de subsistência) e pastagens.



Foto 3.1 - Campo de matacões com vegetação pobre de cerrado, típica da área granítica.

3.4.ASPECTOS GEOLÓGICOS

3.4.1. Geologia Regional

Dentro do contexto de compartimentação tectônica do Proterozóico do estado de São Paulo, Hennies *et al.* (1967a) definiram o Bloco Jundiaí como sendo delimitado pelos grandes falhamentos transcorrentes de Jundiuvira, a Sul, e de Jacutinga, a Norte.

Neste bloco, a Suíte Itu é intrusiva em rochas précambrianas do Complexo Amparo, sendo parcialmente recoberta a oeste pelos sedimentos glaciogênicos do Grupo Tubarão, Subgrupo Itararé.

Wernick (1967) descreve o "Gnaisse Amparo" como o metamorfito predominante na região da cidade homônima. É descrita

uma seqüência de biotita-hornblenda-gnaisses com intercalações concordantes de xistos, quartzitos e calciossilicáticas, com contatos gradacionais entre si. Segundo o autor, a seqüência caracterizaria um único ciclo orogênico.

Ebert (1967) refere-se a uma intensa interdigitação na região de Águas de Lindóia e Itapira entre os paragnaisses do Grupo Amparo e do Grupo Andrelândia. Ebert (1971) correlaciona o Grupo Amparo ao Grupo Barbacena de Minas Gerais, representando um possível embasamento de uma unidade mais recente denominada Grupo Itapira, correlacionável ao Grupo Andrelândia, também em Minas Gerais. O autor propõe para a região de Itapira uma estruturação de um mega-anticlinal, dentro dos quais as unidades descritas se alternam aflorando no interior de sinclinais (xistos e quartzitos de menor grau metamórfico do Grupo Itapira) e anticlinais (gnaisses do Grupo Amparo).

Penalva e Wernick (1973) e Wernick e Penalva (1974) observaram intensa migmatização e feldspatização de rochas do Grupo Amparo por profusa intrusão de material granítico de idade Brasiliana. Em grandes áreas caracterizadas por este fenômeno definiram informalmente o Grupo Pinhal. Para estes autores, áreas de um possível embasamento pré-Amparo são representadas pelo Grupo Barbacena.

Fiori (1979) procura separar do Complexo Amparo as rochas de um embasamento mais antigo, denominando-as de Grupo Silvianópolis. Hasui *et al.* (1981), diante da dificuldade de distinção entre estas duas unidades, preferem englobá-las no denominado Complexo Amparo.

Para Hasui *et al*. (1981), o Complexo Amparo " é limitado a sul pelas falhas de Itu, Jundiuvira e Camanducaia, a norte pela Falha de Jacutinga, sendo recoberto a oeste pelos sedimentos da Bacia do Paraná.".

Campos Neto & Cordani (1985) desmembram do Grupo Itapira os metassedimentos da região de Piracaia, alegando um grau metamórfico mais baixo e ausência dos processos anatéticos marcantes. A estes metassedimentos é atribuída a designação de Complexo Piracaia. Na seqüência, são descritas uma unidade superior de xistos e três unidades gnáissicas.

Galembeck (1991) resume a visão mais recente no sentido е da individualização dos Complexos Amparo Itapira como unidade ortometamórfica representativos de uma е outra respectivamente. Ressalta supracrustal, que а movimentação tectônica e o grau metamórfico do fácies anfibolito alto sobreposto a ambas as unidades tornam sua distinção no campo por vezes bastante difícil.

Muito embora existam poucos trabalhos específicos contendo paragêneses minerais que atestem o grau de metamorfismo do Complexo Amparo, há quase uma unanimidade em torno de um predomínio do fácies anfibolito alto, com o fácies granulito ocorrendo em bolsões de possível embasamento. Efeitos de remigmatização são destacados pelo neossoma róseo utilizado por Wernick & Penalva (1974) na definição do Grupo Pinhal.

Fiori et al. (1978) e Fiori (1979) descrevem quatro fases deformacionais no Complexo Amparo, ligadas ao Arqueano, Transamazônico, Uruaçuano e Brasiliano. Campos Neto & Basei (1983) reconhecem as quatro fases, porém não concordam com a correlação cronológica.

As datações Rb/Sr têm indicado uma idade transamazônica para o Complexo Amparo e arqueana para seus núcleos de possível embasamento. As idades K/Ar caracterizam o Ciclo Brasiliano, responsável por um rejuvenescimento regional e pela geração dos granitóides (Cordani e Bittencourt, 1967, e Wernick *et al.*, 1976).

Para o Complexo Itapira é admitida uma idade máxima do Proterozóico Inferior, com rejuvenescimento Brasiliano (Artur, 1980).

O Subgrupo Itararé no estado de São Paulo corresponde ao ciclo glacial na Bacia do Paraná, possuindo caracteristicamente grande complexidade faciológica.

O contato basal é feito por uma discordância sobre arenitos da Formação Furnas (Grupo Paraná) no sudoeste do estado, e sobre o embasamento cristalino nas demais áreas. O contato superior é também marcado por discordância erosiva, seguida pela deposição dos siltitos arenosos marrom avermelhados da Formação Tatuí.

As litofácies são predominantemente detríticas, ocorrendo principalmente diamictitos, arenitos arcoseanos, arenitos conglomeráticos, conglomerados, siltitos e tilitos. Também característicos são os ritmitos de arenitos finos, siltitos cinza claros e folhelhos cinza escuros, conhecidos como "varvitos de Itu". As principais estruturas sedimentares observadas são as estratificações plano-paralelas finas, estratificações cruzadas de pequeno porte e marcas de ondas.

Estudos paleoambientais indicam predomínio de deposição glacial continental, com áreas relacionadas a planícies de maré com influências fluviais. Os fósseis presentes são bivalves, gastrópodes, braquiópodes, conchostráceos e predominantemente vegetais.

A espessura em subsuperfície é variável entre 900 e 1200 metros, alcançando mais raramente até 1400 metros. O período deposicional correspondente vai do Carbonífero ao Permiano.

3.4.2. Suíte Intrusiva de Itu

A Suíte Intrusiva de Itu aflora como um batólito irregular de eixo maior NE-SW com cerca de 30 Km de extensão e eixo menor entre 10 e 20 Km, com uma área de exposição em torno de 300 Km². O limite sul é marcado pela Falha de Jundiuvira, mas não é por ela afetado. A oeste, o maciço é recoberto pelos sedimentos do Grupo Tubarão.

As rochas encaixantes são gnaisses, xistos e quartzitos englobados no Complexo Piracaia por Pascholati (1990) e no Grupo ou Complexo Itapira por Galembeck (1991) e Hirata *et al.* (1991).

As idades obtidas por Cordani & Bittencourt (1967) e Tassinari *et al.* (1988) definem um intervalo em torno de 590 m.a. A ausência de foliação proeminente e os contatos bruscos marcados por diques e enclaves são representativos de um caráter póstectônico em relação ao Ciclo Brasiliano.

Hasui et al. (1969) descrevem o Maciço Itu como a mais típica intrusão magmática da área, marcadamente discordante, de contatos abruptos e pós-cinemático. Os autores destacam o relevo proeminente sustentado pelo granito, com um grande número de matacões. Não e feita uma diferenciação faciológica do maciço, descrevendo-se apenas uma textura predominantemente hipidiomórfica granular média rosada, com claros sinais de esforços tectônicos.

Através do uso integrado de métodos geofísicos, geológicos, geoquímicos, petrográficos e de sensoriamento remoto, Pascholati *et al.* (1987) redefinem o anteriormente denominado "Granito" ou "Batólito" de Itu, passando a denominá-lo como "Suíte Intrusiva de Itu". Dentro da suíte são individualizados quatro corpos principais, sendo bem caracterizado o Granito Salto, de textura wiborgítica. Uma descrição petrográfica sucinta da Suíte é apresentada, reconhecendo-se dois grupos principais de fácies, de acordo com a presença ou não de anfibólio abundante.

Os biotita-granitos são holeucocráticos a leucocráticos, de granulações médias a grossas e equigranulares, localmente algo porfiríticas. Os ferro-hastingsita-biotita-granitos são variedades hololeucocráticas a leucocráticas de texturas porfiríticas e matriz fina a média, com megacristais predominantemente de feldspato potássico e quartzo subordinado. Dentro deste grupo ocorrem fácies de textura wiborgítica, onde pertitas de contornos arredondados são parcial ou totalmente envolvidas por plagioclásio. Estas fácies são observadas mais tipicamente no Granito Salto.

A classificação modal não permite uma distinção entre os grupos, estando presentes em ambos sieno-granitos (estes predominantes nos ferro-hastingsita-granitos) a monzogranitos (predominantes na porção nordeste da Suíte) e álcali-feldspatogranitos.

São ainda descritos fácies de ocorrência mais restrita, como leuco-dioritóides e microgranitos, por vezes microporfiríticos.

Dando continuidade ao trabalho, com maior ênfase aos estudos gamaespectrométricos, Pascholati (1990) define os Granitos

Itupeva, Fazenda Japão e Fazenda Cruz Alta, separando-os juntamente com o Granito Salto de áreas graníticas englobadas como "indiferenciadas" (Foto 3.2).

Estes estudos permitiram a caracterização da Suíte como notadamente torífera (particularmente os Granitos Salto e Itupeva). Altos valores na razão Th/U indicam a ação de processos tardi a pós-magmáticos nos granitóides, implicando em possíveis mineralizações, o que é confirmado ao menos pela antiga lavra de wolframita de Inhandjara, nas proximidades de Itupeva.



Foto 3.2 - Mapa Geológico simplificado da Suíte Intrusiva de Itu. Adaptado de Pascholati (1990).

Outra conclusão interessante apresentada por Pascholati (1990) é a de que a parte sul da Suíte, onde afloram os Granitos Salto e Fazenda Japão, se encontra em adiantado estágio de erosão, o que poderia explicar a ausência de mineralizações observadas nesta área. Hirata *et al*. (1991), em mapeamento abrangendo a porção meridional da Suíte, distinguem os Maciços Itu e Salto, conforme denominação de Pascholati *et al*. (1987).

No Maciço Itu, os autores diferenciam quatro fácies petrográficos maiores: anfibólio-biotita sienitos róseos grossos inequigranulares, (anfibólio)-biotita álcali-granito salmão ou encarnado muito grosso, anfibólio-biotita granito porfirítico róseo acinzentado claro e biotita granito porfiróide róseo claro.

O Maciço Salto é descrito como um anfibólio-biotita granito porfirítico de textura rapakivi, com megacristais de feldspatos de núcleo potássico róseo e bordas largas de plagioclásio branco. O quartzo também pode ocorrer como megacristais arredondados, por vezes rodeados de concentrações de máficos.

Galembeck (1991) prossegue com um trabalho de mapeamento detalhado sistemático do que denomina de "Complexo" Itu, diferenciando vinte e quatro fácies petrográficos de natureza ígnea distinta, além de inúmeras ocorrências de rochas do embasamento, sedimentos da Bacia do Paraná e coberturas recentes.

O agrupamento espacial dos fácies petrográficos, a análise de lâminas e os estudos de tipologia de zircão permitiram ainda a caracterização de quatro conjuntos intrusivos principais dentro do Complexo, os quais são denominados de Intrusão Salto, Intrusão Indaiatuba, Intrusão Itupeva e Intrusão Cabreúva (Figura 3.2).

As Intrusões Salto e Itupeva correspondem grosso modo às áreas de ocorrência dos granitos homônimos de Pascholati *et al.* (1987) e Pascholati (1990), porém não é clara a relação entre as outras intrusões e os corpos anteriormente definidos no que diz respeito a seus limites, relações espaciais e petrografia.

Galembeck (1991) apresenta um estudo aprofundado da Intrusão Cabreúva, situada nas porções sul e meio-norte do Complexo, subdividindo-a para fins descritivos nos setores Sul, Oriental e Ocidental. Nesta intrusão são diferenciados e descritos



Figura 3.2 - Mapa geologico do Complexo Granitoide de Itu., com detalhamento da Intrusao Cabreuva. Simplificado de Galembeck (1991).

oito fácies granitóides distintos, além de duas associações de fácies (Figura 3.2).

A análise de dados de campo, geoquímica, tipologia de zircão e lâminas petrográficas permitiu a Galembeck (1991) a proposta de uma seqüência evolutiva dos fácies, conforme indicada na Figura 3.3. A confirmação da hipótese apresentada fica bastante prejudicada pela ausência de relações de campo entre muitos dos fácies.

FACIES E ASSOCIAÇÃES XE FACIES

INFULSOS FASES



Figura 3.3 - Diagrama mostrando a evolução faciológica da Suíte Itu, segundo proposta de Galembeck (1991).

3.4.3. Aspectos Metalogenéticos

Os trabalhos desenvolvidos por diferentes autores sobre a Suíte Intrusiva de Itu (Pascholati *et al.* (1987), Pascholati (1990), Vlach *et al.* (1990), Amaral & Pascholati (1990) e Galembeck (1991)) caracterizaram-na como sendo composta por granitos tipo "**A**" de Pitcher (1982). Segundo Janasi e Vlach (1991), a origem dos granitos tipo A da série aluminosa, onde estaria enquadrada a Suíte, está associada à fusão de crosta inferior, provocada por underplating de magma básico. Entre outras mineralizações potenciais associadas a este tipo de granito destacam-se as de estanho e wolfrâmio.

Este tipo de mineralização está associado às fases ígneas finais, com concentração de voláteis ricos em elementos incompatíveis. As concentrações minerais podem ocorrer tanto internas quanto externas à rocha granítica geneticamente relacionada, sendo o principal fator condicionante a presença de descontinuidades que permitam o fluxo do fluido e a deposição de veios.

A maior mineralização conhecida relacionada à Suíte é a mina de Inhandjara, situada a nordeste de Itupeva, descrita pormenorizadamente por Saldanha (1946), hoje abandonada (Foto 3.3).



Foto 3.3 - Entrada da mina de wolframita de Inhandjara, a nordeste de Itupeva. Tratam-se de exogreisens encaixados em gnaisses do embasamento, condicionados por fraturamentos.

Trata-se de uma mineralização de exogreisens com veios de até um metro de espessura encaixados em gnaisses do Grupo Amparo, onde o principal mineral de minério é a wolframita, ocorrendo como acessórios cassiterita, topázio, fluorita, pirita, galena, molibdenita e calcopirita, além de quartzo e sericita como minerais de ganga. Esta ocorrência foi por muito tempo a única produtora de wolfrâmio de São Paulo, saindo de exploração no final da década de 50.

As ocorrências internas à Suíte são, no entanto, de porte bastante reduzido, estando comumente associadas aos grandes falhamentos que possibilitaram o aporte de fluidos.

Com base em dados geofísicos, Pascholati (1990) conclui granitos Itupeva possuem grande que OS Salto e potencial metalogenético, porém o primeiro encontra-se já em adiantado estágio erosivo. Em virtude dos altos teores de elementos radioativos, é ainda levantada a possibilidade de caracterização do Granito Itupeva como um "granito quente", onde os estágios hidrotermais tornam-se mais intensos e as soluções mineralizantes mais ativas. Estas características são potencializadas pelo grande fraturamento presente, possivelmente associado ao Falhamento de Inhandjara (Pascholati, 1990).

A Pedreira Tocantins, explorada pela Camargo Correa e localizada na porção nordeste do Granito Itupeva, a pouco menos de 1 Km da rodovia dos Bandeirantes, se destaca como a maior ocorrência conhecida de alteração hidrotermal interna à Suíte Granítica de Itu.

O granito aflorante possui textura equigranular hipidiomórfica fina a média, com coloração rósea predominante, localmente esbranquiçada. O grande número de fraturas observado é fator distintivo dentro do contexto regional, estando estes sistemas de fraturamento possivelmente associados à fase de resfriamento do plúton e/ou ao grande lineamento NNE que corta o corpo granítico a oeste (Falha de Inhandjara).

A mineralogia básica do granito é composta por quartzo, microclínio, oligoclásio e biotita, sendo os principais acessórios

magnetita, zircão e alanita. Como minerais traços são reconhecidos titanita, topázio e arfvedsonita. A textura ígnea encontra-se bem preservada mesmo nas porções mais alteradas, embora alguma deformação possa ser identificada nos grãos de quartzo e oligoclásio.

A alteração hidrotermal se manifesta por veios de entre o verde dimensões coloração escura, e o negro, de a decimétricas, por vezes ricos sulfetos, milimétricas em condicionados tectonicamente por um sistema de fraturas de atitude média N37W/87NE. A concentração e a pujança destes veios são irregularmente distribuídas pelo corpo, sendo difícil estabelecer uma espessura e um espaçamento médios.

A passagem lateral entre o granito e os veios é nítida e gradual, observando-se a substituição dos minerais originais por epidoto, clorita, sericita e deposição de fluorita e sulfetos. Nos locais onde há abertura das fraturas observa-se a formação de "bolsões" estirados onde a mineralogia original é dificilmente preservada. Veios de quartzo são raros, não possuindo quando presentes grande quantidade de sulfetos.

A pirita é o sulfeto predominante, ocorrendo sob forma euhedral por vezes fraturada, indicando que sua formação foi ao menos em parte concomitante com um processo de deformação rúptil. Ocorrem ainda subordinados calcopirita, pirrotita, esfalerita e galena.

A pequena dimensão da ocorrência, com inúmeros veios milimétricos, mostra uma relação fluido/rocha baixa, dentro de um sistema geoquimicamente tamponado, ou seja, a rocha sofreu transformação mineral progressiva de forma a consumir todo o fluido disponível mantendo-se as condições de equilíbrio mineralógico.

Para a caracterização do quimismo do fluido hidrotermal e das reações com o granito encaixante foram coletadas amostras distribuídas ao longo de um perfil lateral entre o granito pouco alterado e o núcleo de um veio rico em sulfetos bem desenvolvido. Estas amostras foram utilizadas para a confecção de lâminas

delgadas e polidas, assim como para a análise química de elementos maiores e menores.

As análises foram realizadas no laboratório de geoquímica do Instituto de Geociências da UNICAMP, tendo-se utilizado os métodos de fluorescência de RX (para Al, Zr, Si, K, Fe, Ca, Rb, Sr, Nb e Y) e absorção atômica (para Na, Mg e Mn). Os resultados são reunidos na Tabela 3.1, e as Figuras 3.4 a 3.7 ilustram o comportamento dos elementos ao longo do perfil de alteração.

Amostra	S1001	S1002	S1003	S1004	S1005
Descrição Sucinta	Granito branco	Granito róseo	Granito alterado	Borda de Veio	Veio de alteração
CaO (%)	0.44	0.52	1.11	1.16	2.14
Na ₂ O (%)	4.22	4.28	3.75	1.78	0.30
K ₂ O (%)	4.36	4.55	2.67	2.06	5.36
Al ₂ O ₃ (%)	12.84	12.99	10.64	7.10	14.60
Fe ₂ O ₃ (%)	0.14	0.28	0.80	2.29	2.51
FeO (%)	0.52	0.49	1.28	2.45	2.10
MgO (%)	0.01	0.01	0.05	0.08	0.12
SiO ₂ (%)	76.6	76.5	79.2	82.6	70.6
MnO (%)	0.03	0.04	0.12	0.28	0.44
H ₂ O (응)	0.05	0.08	0.06	0.17	0.25
P.F. (%)	0.43	0.46	0.85	2.14	3.33

Tabela 3.1 : Análises químicas de um perfil lateral de alteração dogranito Itupeva. Amostras coletadas na Pedreira Tocantins.



Figura 3.4 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins, entre a rocha pouco alterada (à esquerda) e o veio bem desenvolvido (à direita).



Figura 3.5 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hídrotermal da Pedreira Tocantins, entre a rocha pouco alterada (à esquerda) e o veio bem desenvolvido (à direita).



Figura 3.6 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins, entre a rocha pouco alterada (à esquerda) e o veio bem desenvolvido (à direita).



Figura 3.7 - Diagrama de comportamento geoquímico na alteração hidrotermal da Pedreira Tocantins, entre a rocha pouco alterada (à esquerda) e o veio bem desenvolvido (à direita).

A partir destas observações e de informações obtidas na literatura procurou-se estabelecer um modelo para a natureza do fluido hidrotermal e para as alterações dele resultantes.

O elevado teor de elementos radioativos no Granito Itupeva (da ordem de 4,28 % K, 7,5 ppm U e 34.6 ppm Th, segundo Pascholati, 1990) e a grande produção de calor daí resultante (da ordem de 4,1 microW/m³, segundo Pascholati, 1992) poderiam ser apontados como importantes fatores para a geração de um fluxo hidrotermal secundário, de origem meteórica e não puramente ígnea, nos estágios finais de consolidação e resfriamento do plúton.

Graças à abertura de fraturamentos no granito, a permeabilidade é aumentada e a água infiltrante atinge níveis mais profundos no interior do granito, sofrendo aquecimento pela radiação e reagindo com as paredes, provocando importantes alterações mineralógicas.

Este mecanismo pode ser embasado nas observações de campo e nas lâminas delgadas, tendo caráter inicial de hidratação dos minerais, de acordo com as reações abaixo, extraídas de Lobato (1992):

- a) 2 NaCaAl $_{3}Si_{5}O_{16} + 2 SiO_{2} + Na^{+} + H_{2}O = Ca_{2}Al_{3}Si_{3}O_{11}(OH) + 3 NaAlSi_{3}O_{8} + H_{*}$ (oligoclásio + sílica + áqua = clinozoisita + albita)
- b) KAlSi₃O₈ + 6,5 Mg²⁺ + 10 H₂O = Mg_{6,5}(Si₃Al)O₁₀(OH)₈ + K⁺ + 12 H⁺ (microclinio + água = clorita)
- C) 2 NaAlSi₂O₈ + 4 (Mg,Fe)²⁺ + 2 (Fe,Al)³⁺ + 10 H₂O = 4 SiO₂ + 2 Na⁺ + (Mg,Fe)₄(Fe,Al)₂Si₂O₁₀(OH)₈ + 12 H⁺ (albita + água = sílica + clorita)

Se desconsiderarmos os elementos presentes em ambos os membros das equações, apenas para efeitos de raciocínio, poderemos entender o processo como a reação dos feldspatos da rocha com a água do fluido, produzindo clinozoita e clorita e liberando essencialmente K⁺ e H⁺. Estes íons modificam a acidez do fluido percolante, que passa a ser agente hidrolisante:

 $\begin{array}{l} \textbf{d} \\ \textbf{3} \quad \texttt{KAlSi}_{3}\textbf{O}_{e} + 2 \quad \texttt{H}^{+} = \quad \texttt{KAl}_{3}\texttt{Si}_{3}\textbf{O}_{1e}(\texttt{OH})_{2} + 6 \quad \texttt{SiO}_{2} + 2 \quad \texttt{K}^{+} \\ & (\texttt{feldspato pot} \texttt{assico} + \texttt{H}^{-+} = \quad \texttt{sericita} + \quad \texttt{silica}) \\ \textbf{e} \\ \textbf{KAlSi}_{3}\textbf{O}_{e} + 2 \quad \texttt{NaAlSi}_{3}\textbf{O}_{e} + 2 \quad \texttt{H}^{+} = \quad \texttt{KAl}_{3}\texttt{Si}_{3}\textbf{O}_{1e}(\texttt{OH})_{2} + 6 \quad \texttt{SiO}_{2} + 2 \quad \texttt{Na}^{+} \\ \end{array}$

(feldspato potássico + albita + H $^+$ = sericita + sílica) f) Biotita + H $^+$ = clorita + SiO₂ + 2 K $^+$ + (Mg,Fe) $^{2+}$

O caráter dinâmico destas reações deve sempre ser lembrado, ocorrendo deslocamentos dos equilíbrios segundo a variação da composição do fluido e seu tamponamento pela rocha.

Nos diagramas apresentados, a passagem da fase inicial de hidratação para a final de hidrólise é bem marcada pela inversão dos comportamentos da sílica, do potássio e do alumínio. Em lâminas delgadas, este deslocamento é marcado por vênulas de sericita cortando feldspatos alterados a epidoto e clorita.

Na fase de hidrólise, há resfriamento da salmoura rica em metais, com dissociação dos complexos a cloro e aumento da redução do íon sulfato presente no fluido, com formação de HS^- e H_2S . A deposição dos metais sob a forma de sulfetos se dá de acordo com as seguintes reações simplificadas, também apresentadas por Lobato (1992):

(g) $MeCl_{2(aq)} = Me^{2+} + 2 Cl^{-}$

(h) $HSO_{4-} + H^+ = H_2S + O_2$

(i) $HSO_{4-} + H^+ + 4 H_2 = H_2S + 4 H_2O$

(j) $Me^{2+} + H_2S = 2 H^+ + MeS$

O H⁺ é consumido na geração da sericita, e o equilíbrio deslocado para a direita.

O mesmo fluido aquecido poderia ser responsável pelo enriquecimento em urânio observado na pedreira, associado às ocorrências de fluorita.

Gabelman (1977) afirma que até um terço do urânio presente nas rochas graníticas ocorre na forma intergranular, como óxido intersticial ou agregado cristalino, e como tal pode ser remobilizado por fluidos hidrotermais. Alguns minerais, como micas, zircão e feldspato potássico, são ainda apontados como notáveis por seu conteúdo de urânio como elemento traço, e sua alteração pode liberar o urânio para o fluido.

A temperaturas entre 200 e 400 graus Celsius, UF₄ é mais estável que UF₆. UF₄ é solúvel em fluidos ácidos a temperatura

ambiente, e o urânio pode ser transportado por complexos clorados. Com a queda da temperatura e o consumo de H⁺ pela sericitização, os complexos clorados tornam-se instáveis (reação (g)), e o urânio quadrivalente pode ser capturado pela fluorita ou se depositar como UF_4 .

Este fluido gerador da ocorrência da Pedreira Tocantins teria, portanto, uma origem totalmente distinta daquele gerador da mina de wolframita de Inhandjara, este sim de natureza ígnea e anterior.

Do ponto de vista do potencial metalogenético, a pedreira visitada não apresentou resultados considerados promissores, pois as abundâncias de fluorita e mesmo pirita não são econômicas. As características da ocorrência são ainda bastante distintas de ambientes metalogeneticamente importantes relacionados a corpos graníticos, como os depósitos porfiríticos e os depósitos epitermais.

Em resumo, dois tipos de modelos metalogenéticos poderiam ser admitidos para a área da Suíte: um modelo ígneo "clássico", com evolução de fácies mais ricos em cálcio e ferro para fácies mais alcalinos, e um modelo superimposto ao primeiro, onde os grandes falhamentos presentes assumem importante papel para a circulação de fluidos aquecidos os quais promovem a remobilização de elementos e sua precipitação sob a forma de novos minerais.

4. DEFINIÇÃO DAS ÁREAS DE MAIOR POTENCIAL METALOGENÉTICO

4.1.INTRODUÇÃO

A determinação de áreas internas à Suíte Granítica com maior potencial metalogenético foi realizada utilizando-se imagens *raster* geradas a partir dos dados aerogeofísicos e geoquímicos disponíveis, adotando-se um modelo bastante simples e tradicional de evolução de magmas graníticos.

Segundo este modelo, áreas de fácies mais evoluídos serão enriquecidas em elementos incompatíveis (entre os quais o urânio e o tório), podendo estar associadas a atividades de hidrotermalismo comumente representadas por forte enriquecimento em sódio e/ou potássio. Estes fluidos com potencial mineralizante podem ainda estar condicionados por descontinuidades na rocha que permitam seu fluxo e a deposição de minerais de interesse econômico.

4.2.TRATAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS

4.2.1.Natureza dos Dados Utilizados

Os dados de aerogeofísica utilizados são referentes ao Projeto São Paulo-Rio de Janeiro, sub-área 6, tendo sido cedidos pela CPRM para este trabalho. O levantamento aéreo foi realizado pela Encal, entre junho de 1978 e fevereiro de 1979.

As linhas de vôo têm direção NS com espaçamento médio planejado de 1 Km. As medidas ao longo de cada linha são de 100 em 100 metros e a altura de vôo média planejada é de 150 metros sobre o terreno.

O pré-processamento dos dados foi realizado pela CPRM (Anjos e Mourão, 1988), consistindo de correção de altitude, efeito Comptom, *background*, transformação de coordenadas e reformatação dos dados. Uma breve revisão destes procedimentos pode ser encontrada em Ferreira (1991).

4.2.2. Análise Estatística

A análise estatística dos dados permitiu a observação de uma aparência lognormal das grandezas medidas pela aerogamaespectrometria e uma aparência próxima do normal para a aeromagnetometria. As razões Th/K e U/Th apresentam valores extremamente anômalos, que distorcem o comportamento geral das populações. Estes valores podem ser devidos a erros de medida e/ou a fenômenos geológicos que alterem a correlação primária entre os elementos, devendo portanto ser analisados com cautela.

A análise de correlogramas entre os diversos canais de gamaespectrometria não nos permitiu a caracterização de uma correlação direta entre eles, nem de tendências nas direções das linhas de vôo ou transversais a estas.

4.2.3. Processamento dos Dados e Geração das Imagens

O método de interpolação aplicado para a geração das imagens *raster* foi o de "curvaturas mínimas", conforme apresentado por Briggs (1974). Para tanto, utilizou-se o programa *minc.exe*, do USGS (Open-file Report 81-1224), de domínio público.

Este método gera um *grid* regular utilizando funções do tipo *cubic spline* as quais possuem como características básicas a minimização da curvatura entre os pontos e a manutenção dos valores originais nos pontos amostrados.

A interface entre o programa do USGS e o **GRASS** (*Geographical Resources Analysis Support System*), Sistema de Informações Geográficas desenvolvido no U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory utilizado para a geração das imagens finais, foi feita utilizando-se rotinas desenvolvidas no LAPIG (Laboratório de Processamento de Informações Georeferenciadas da UNICAMP) e publicadas por Ribeiro *et al.* (1993).

As imagens obtidas (Fotos 4.1 a 4.4) são de qualidade considerada adequada aos objetivos propostos, pois mostram uma continuidade entre os dados e possuem uma boa correlação com os mapas geológicos disponíveis.


Foto 4.1 - Imagem do canal do urânio, interpolada pelo método de curvatura mínima. Em branco, contorno do mapa geológico de Galembeck (1991).



Foto 4.2 - Imagem do canal do tório, interpolada pelo método de curvatura mínima. Em branco, contorno do mapa geológico de Galembeck (1991).





Foto 4.3 - Imagem do canal do potássio, interpolada pelo método de curvatura mínima. Em branco, contorno do mapa geológico de Galembeck (1991).



Foto 4.4 - Imagem do canal de contagem total, pelo método de curvatura mínima. Em branco, contorno do mapa geológico de Galembeck (1991).

Nestas imagens as áreas anômalas estão em tons de vermelho, seguidas pelo verde. Os tons azul e preto marcam as áreas com teores de radiação muito baixa.

Existem aqui duas questões a serem discutidas: a primeira diz respeito ao fenômeno de *aliasing* e a segunda às dimensões do pixel a ser interpolado.

O fenômeno de aliasing é derivado da interferência da anisotropia de amostragem segundo as direções das linhas de vôo e perpendicular a estas. Sem uma devida filtragem, as altas frequências geradas pela informação mais detalhada tendem a interferir como ruído no processo de interpolação, gerando artefatos. A filtragem é feita no domínio espacial ao longo de cada linha de dados, sendo apenas posteriormente realizada а interpolação.

Como teste para a área de estudo foram utilizados programas em FORTRAN escritos e cedidos pelo Prof. Wladimir Shukowsky, do Instituto Astronômico e Geofísico da USP. Nestes programas é utilizado um filtro de Butterworth recursivo de 5ª ordem, cujos coeficientes são definidos pela relação entre a frequência de corte (a qual deve ser idealmente igual ao espaçamento entre as linhas de vôo) e a Frequência de Nyquist (o inverso da menor distância entre amostras).

Após a filtragem o método de interpolação foi exatamente o mesmo utilizado para os dados originais. As novas imagens geradas (Fotos 4.5 a 4.7), com efeito, apresentam as áreas anômalas mais nítidas, notadamente para o canal do urânio. A continuidade entre estas áreas é realçada, e há mesmo sua expansão em relação às imagens não filtradas.

Não obstante, nenhuma informação importante foi acrescentada, já que todas as áreas anômalas estão presentes nas imagens iniciais. Uma vez que a filtragem implica na exclusão de informação local, e que a manutenção desta informação não afetou gravemente os resultados finais, optou-se pela utilização das imagens não filtradas para a continuidade do trabalho.



Foto 4.5 - Imagem do canal de urânio, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima.



Foto 4.6 - Imagem dio canal de potássio, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima.



Foto 4.7 - Imagem do canal de contagem total, filtrada para eliminação de aliasing e interpolada pelo método de curvatura mínima.

A outra questão a ser levantada neste tipo de procedimento é a definição das dimensões do pixel final. Muito embora hajam diversas referências a "limites", estes são via de regra muito amplos e imprecisos, sem que sejam apresentados dados concretos de comparação entre diferentes dimensões interpoladas. Estes limites são sempre referidos em função do espaçamento entre as linhas de vôo, variando de autor para autor: 1/3 a 1/8, em alguns casos atingindo-se 1/10 (Crósta, 1990), 1/2 (Ferreira, 1991), entre 1/4 e 1/8 (Ferreira, 1992) e Rolim *et al.* (1993). Finalmente, no documento do USGS acompanhando o programa de curvatura mínima fala-se de um limite entre 1/2 e 1/5 do espaçamento entre as linhas de vôo.

A solução encontrada neste trabalho foi a de geração de imagens com pixels de tamanhos distintos (90, 120 e 180 metros), para testes de comparação com dados terrestres disponíveis. Para o teste foram utilizados os canais do tório e do potássio, pois o urânio é naturalmente sujeito a maiores flutuações.

A comparação destas imagens com as medidas terrestres realizadas por Pascholati (1990) foi feita segundo procedimentos semelhantes aos utilizados por Ferreira (1991).

A partir das imagens *raster* geradas no **GRASS** obtiveramse os conjuntos de valores referentes às mesmas coordenadas dos pontos terrestres, admitindo-se um deslocamento máximo entre pontos correspondentes da ordem de 50 metros. Estes dados foram então correlacionados aos valores terrestres convertidos para *cps* a uma altura de 150 metros, sendo os coeficientes de correlação obtidos apresentados na Tabela 4.1:

	90 metros	120 metros	180 metros
Potássio	0,191	0,336	0,230
Tório	0,409	0,423	0,417

Tabela 4.1 : Correlação entre dados terrestres e aéreos interpolados, em função do tamanho do pixel.

A partir destes valores, optou-se pela utilização da imagem com pixel de 120 metros, o que corresponde a uma relação de 1/8 do espaçamento médio entre as linhas de vôo. A imagem referente ao canal do urânio foi então gerada, obtendo-se um coeficiente de correlação de 36,27 %.

Deve-se notar que estes valores são da mesma ordem de grandeza que os obtidos por Ferreira (1991) para uma malha de interpolação de 500 metros utilizando o BIGRID (0,37 para o potássio, 0,22 para o urânio e 0,52 para o tório), o que denota o bom desempenho do método aqui utilizado.

A baixa correlação entre os valores é de certa forma esperada, em função de fatores tais como a atenuação atmosférica, a atenuação devida à presença de água no solo e vegetação (Lavreau

& Fernandez-Alonso, 1991) e o caráter pontual da medida terrestre, em contraste com um caráter radial das medidas aéreas.

4.2.4. Interpretação das Imagens e Discussões

4.2.4.1. Imagens Originais (Canais Individuais)

O canal do potássio (Foto 4.3) é o que melhor delimita a Suíte como um todo, sendo os contornos da porção Norte os melhor delineados. O canal do urânio (Foto 4.1) apresenta o maior número de ruídos, e o de tório (Foto 4.2) possui características intermediárias entre os dois.

O canal de contagem total (Foto 4.4) funciona como um filtro, uma vez que alia a boa delimitação da Suíte com a eliminação dos ruídos do urânio e da forte anomalia de potássio devida ao grande falhamento de Itu, a sul da Suíte.

Duas grandes anomalias externas à área de exposição principal devem ser ressaltadas: a primeira, a Nordeste do Itupeva e bem marcada pelo canal de potássio (Foto 4.3), pode representar uma continuidade do corpo, uma vez que se posiciona de forma concordante com o *trend* apresentado. A segunda, a Noroeste de Indaiatuba e realçada pelo canal do urânio (Foto 4.1), tem ainda razões desconhecidas, correspondendo a uma área de exposição de planície aluvionar.

O Granito Salto apresenta em média baixos conteúdos nos três elementos, sendo seus contornos a Sul e Leste realçados possivelmente em função da presença de falhamentos associados, com enriquecimento em potássio. O recobrimento por Oeste pelos sedimentos da Bacia do Paraná é também caracterizado, confundindose com as manchas de embasamento propostas por Pascholati (1990).

O Granito Indaiatuba é relativamente pobre em urânio, sendo a forte anomalia interna observada provavelmente relacionada ao fácies porfirítico róseo (CA-3) do Granito Cabreúva, conforme proposto por Galembeck (1991). Esta mesma anomalia é observada nas imagens de tório e potássio, estendendo-se lateralmente possivelmente em função do interpolador e de um conteúdo em potássio um pouco mais elevado.

O Granito Itupeva é o mais rico nos três elementos, possuindo seus contornos externos bem delineados. No corpo principal, as anomalias estão concentradas nas bordas leste e oeste, possivelmente relacionadas aos falhamentos de Inhandjara (Pascholati, 1990) e da Cachoeira (Hasui *et al.*, 1977), mas não se limitando a eles espacialmente. A grande mancha de embasamento proposta por Pascholati (1990) é bem marcada pelo canal do potássio. O corpo isolado a oeste possui características distintas, sendo essencialmente pobre nos três elementos, levando-nos à suposição de uma origem distinta.

O Granito Cabreúva é o mais heterogêneo, porém não foi possível uma correlação direta entre os elementos radiogênicos e os fácies propostos por Galembeck (1991).

O corpo principal é basicamente pobre em tório, à exceção do bordo SW, onde ocorrem também importantes anomalias de potássio e urânio. Uma pequena anomalia de urânio ocorre na porção central, porém é o canal do potássio o que melhor caracteriza a heterogeneidade interna do corpo. Estas anomalias de potássio exibem um alinhamento sugestivo de seu condicionamento estrutural, e não necessariamente relacionado a uma diferenciação faciológica. Desta forma, as maiores anomalias estão associadas às bordas de caráter tectônico, ao contorno Sul (Falha de Jundiuvira), ao contorno do Fazenda Cruz Alta (Pascholati, 1990) e à Falha de Itaguá.

O corpo ocidental apresenta baixos conteúdos em elementos radioativos, e mais uma vez os maiores valores estão relacionados aos contatos entre os fácies propostos por Galembeck (1991).

As áreas com maiores anomalias da Suíte estão associadas ao corpo oriental do Granito Cabreúva, porém ainda neste caso parece haver uma forte ligação com o Falhamento de Inhandjara (Pascholati, 1990).

Em resumo, as principais conclusões podem ser assim apresentadas:

- as imagens permitem uma boa delimitação da Suíte Granitóide;

- as principais anomalias de potássio parecem estar relacionadas às grandes estruturas;

 na porção leste do Granito Itupeva há enriquecimento em urânio e tório em relação ao potássio, o que diferencia a área das demais anomalias internas à Suíte;

há uma boa correlação com os corpos definidos por
 Pascholati (1990), não havendo entretanto subsídios para a separação dos Granitos Fazenda Cruz Alta e Fazenda Japão (Foto 3.2);

 não foi obtida boa correlação entre as imagens e os fácies mapeados por Galembeck (1991), representados na Figura 3.2;

- as manchas de embasamento e bacia internas à Suíte são bem caracterizadas pelas imagens;

 - o Granito Itupeva (incluindo aqui o denominado corpo oriental da Intrusão Cabreúva) apresenta as maiores anomalias gamaespectrométricas, o que o potencializa como área preferencial para a prospecção mineral.

4.2.4.2.Imagens de Componentes Principais, Razões de Bandas e Imagens Classificadas

Uma vez geradas e analisadas as imagens referentes a cada um dos canais gamaespectrométricos, foi dada continuidade ao processamento digital pelo Sistema 600/I2S, com a geração de imagens de componentes principais, imagens classificadas e imagens de razões de canais.

A primeira componente principal (Foto 4.8), visualizada em pseudo-cor, permite a boa individualização da Suíte como um todo, além dos principais lineamentos. As manchas de bacia e embasamento nos Granitos Salto e Itupeva são distintas, assim como o recobrimento do primeiro pelos sedimentos da Bacia do Paraná. É indicada uma continuidade entre as cunhas de embasamento propostas por Pascholati (1990) no limite entre os granitos Salto e Cruz Alta. Esta continuidade pode não ser correta, podendo ser devida a

problemas com o interpolador em função do espaçamento entre as linhas de vôo.



Foto 4.8 - Primeira Componente Principal das imagens aerogeofísicas.

Na borda leste do Granito Salto há uma aparente continuidade para Norte, o que deve ser um artefato em função da malha de amostragem, não eliminado pelo interpolador.

O Granito Itupeva tem o contorno nítido, bem próximo do proposto por Pascholati (1990) e Galembeck (1991). As maiores anomalias são destacadas, localizando-se principalmente nas bordas. As manchas de embasamento são claras, havendo aparentemente um pequeno exagero nas dimensões da cunha entre as Falhas do Quilombo e da Fonte por parte de Pascholati (1990).

A julgar pela imagem, o recobrimento do Granito Indaiatuba pelos sedimentos da Bacia do Paraná pela borda oeste seria mais intenso, porém este pode ser um resultado da maior ocupação humana com o decorrente mascaramento da radiação natural,

uma vez que cerca de 90 % da radiação medida se deve aos primeiros 90 cm de exposição.

No interior do Granito Cabreúva não foi observada uma correlação direta entre a radiação medida e os fácies mapeados por Galembeck (1991), podendo-se apenas reconhecer que os fácies equigranular cinza fino a médio (CB-2), equigranular róseo fino a médio (CB-3) e a associação melagranitóide (CB-8) são pobres em elementos radioativos. As demais relações entre os fácies não são claras, ocorrendo valores altos e baixos aparentemente dispersamente distribuídos.

A segunda componente principal (Foto 4.9) individualiza apenas as áreas mais anômalas, principalmente no interior do Itupeva, destacando ainda a Falha de Itu, delimitando a Suíte a Sul.



Foto 4.9 - Segunda Componente Principal das imagens aerogeofísicas.

A terceira componente apresenta forte ruído, e não acrescenta nenhuma informação às observações anteriores.

As razões entre os canais de urânio, tório e potássio foram calculadas a partir das imagens de cada canal, preferindo-se não utilizar uma interpolação para os dados fornecidos pela CPRM.

Muito pouca informação adicional pôde ser obtida por estas imagens, ficando apenas muito bem caracterizado o enriquecimento de potássio ao longo da Falha de Itu (Foto 4.10), o que não ocorre na Falha de Inhandjara. Os fenômenos atuantes em cada uma das áreas foram, portanto, distintos.



Foto 4.10 - Razão potássio/tório dos dados aerogeofísicos. Observe o falhamento NW enriquecido em potássio, a NE de Itu.

A imagem classificada com três categorias (Foto 4.11) permite a boa delimitação da Suíte, a distinção das manchas de embasamento, a individualização das cunhas entre o Salto e o Cruz Alta e o reconhecimento das maiores anomalias, incluindo aquela a noroeste, de origem desconhecida. Como resumo das informações é boa, porém não permite a análise de heterogeneidades internas.

As imagens com 5 e 11 categorias (Figuras 4.12 e 4.13) possuem uma gama de informações maior, ainda que um pouco dispersa. A última é semelhante à imagem de primeira PC, cabendo assim os mesmo comentários anteriormente relacionados a esta. Uma observação interessante é a de que a porção central do Granito Cabreúva é mais pobre em elementos radioativos, o que poderia ser entendido como uma área de exposição de fácies pouco evoluídos.



Foto 4.11 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com três categorias.



Foto 4.12 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com cinco categorias.



Foto 4.13 - Classificação não supervisionada dos dados aerogeofísicos, com onze categorias.

4.3. TRATAMENTO DOS DADOS GEOQUÍMICOS

4.3.1.Natureza dos dados

Os dados disponíveis são de geoquímica de rocha total, sendo fornecidos por Pascholati (inédito), com 119 amostras de 33 elementos cada e complementados a partir de Galembeck (1991), com 35 amostras de 28 elementos cada.

4.3.2.Fusão dos dados

Uma vez que os métodos analíticos utilizados pelos dois autores foram distintos, a primeira preocupação foi o estudo da viabilidade da fusão das análises em um único banco de dados. Um importante fator a ser considerado é o próprio caráter estatístico da amostragem de geoquímica de rocha, onde os valores obtidos têm caráter pontual, estando sujeitos a grandes variações laterais em função da própria heterogeneidade da rocha.

O procedimento adotado foi o de caracterizar as duas populações de dados individualmente, não apenas no que concerne às medidas estatísticas básicas como média e desvio padrão, mas também analisando-se a correlação entre os elementos e a disposição espacial das anomalias, entre outras propriedades interessantes.

Os dados foram tratados em dois *softwares* distintos: inicialmente foi feita a análise estatística propriamente dita com o programa **Statgraphics** e, posteriormente, foram montados arquivos de entrada para o **GRASS**, onde foram criadas as imagens *raster* para a visualização das anomalias.

Caracterizou-se, desta forma, uma sobreposição estatística das duas populações, com correlações entre elementos semelhantes definindo grupos de mesmo comportamento geoquímico, e concordância entre as anomalias a nível espacial, considerando-se as diferentes malhas de amostragem.

Como teste final, foram selecionadas as amostras coletadas muito próximas pelos dois autores, obtendo-se para estas amostras um coeficiente de correlação de 0.92, um índice considerado muito bom levando-se em conta a heterogeneidade natural do volume amostrado, a não coincidência dos pontos de amostragem e os métodos analíticos distintos.

A partir destes estudos iniciais, as análises químicas foram agrupadas em um único banco de dados com 154 amostras, reiniciando-se a caracterização estatística da população como um todo. Deve-se ressaltar que esta fusão de dados tem objetivos puramente visuais, de caráter interpretativo e qualitativo, razão pela qual testes estatísticos mais rigorosos não foram considerados necessários. Sendo a área de exposição da Suíte da ordem de 310 Km², atingiu-se uma média de amostragem de 0.5 amostras/Km².

A determinação de grupos de elementos de comportamento geoquímico similar, utilizando-se os coeficientes de correlação, é um procedimento padrão já consagrado, porém de poucos resultados para o caso estudado. O procedimento considerado mais indicado para este caso foi também o mais simples e direto, ou seja, a utilização dos elementos maiores comumente empregados na caracterização dos granitos (Si, Al, Ca, Na, K, Fe e Mg). Estes elementos são suficientes para a delimitação das áreas mais evoluídas dentro da Suíte, foram analisados por ambos os autores e possuem boa precisão analítica, agrupando assim propriedades consideradas adequadas para este trabalho.

4.3.3.Geração das imagens

A geração das imagens *raster* foi feita de maneira similar à dos dados aerogeofísicos, ou seja, utilizando-se o programa de interpolação de valores por curvatura mínima para a geração de um *grid* quadrado regular, com células de 120 metros.

Como não foram coletadas amostras fora da Suíte Granítica, por razões óbvias, a interpolação de valores externos ao contorno definido pelas amostras coletadas carece de maior significado. O mesmo problema é observado nas grandes manchas de embasamento presentes no interior dos Granitos Salto e Itupeva. A interpolação externa aos limites das amostras coletadas pode ser encarada como uma tendência nas proximidades das amostras, porém perde qualquer valor à medida que cresce a distância entre os valores interpolados externos e as amostras mais próximas.

Um artifício interessante é o de utilizar um mapa geológico como "máscara" para a visualização das imagens finais, de

forma que o contorno da Suíte Granítica seja respeitado. Esta "máscara" foi utilizada somente na etapa de visualização, e não tem qualquer influência sobre os dados interpolados.

A simples geração das imagens referentes a cada um dos elementos e/ou de suas razões diretas não forneceu bons resultados, em função do intervalo restrito dos valores (já que se trata de uma Suíte Granítica) e da difícil integração dos dados individuais em um quadro mais geral de heterogeneidade da Suíte.

Galembeck (1991) demonstrou que diagramas ternários podem ser úteis na discriminação dos fácies internos à Intrusão Cabreúva. Este mesmo princípio foi adaptado para a geração de imagens RGB, onde as combinações em diferentes proporções das cores primárias vermelho, verde e azul resultam em cores compostas distintas que se fazem assim relacionadas à composição geoquímica da amostra considerada.

O processo de geração da imagens é simples, feito em etapas, como apresentadas a seguir:

 os valores dos óxidos de interesse são recalculados para 100 % (três óxidos, como num diagrama ternário);

 para cada um dos óxidos é criado um arquivo do tipo
 "X Y Z" em ASCII, para entrada no programa de gridagem por curvatura mínima;

- o grid quadrado é transformado em imagem raster pelo **GRASS;**

- a composição RGB é criada também pelo **GRASS**, embora outro *software* de processamento de imagens pudesse ser utilizado para este fim, como o próprio Sistema 600/**I2S** (*International Imaging Systems*).

Para melhor compreensão dos resultados, um gabarito triangular auxiliar foi criado, onde podem ser observadas as variações entre os vértices e a área central do diagrama, esta última com valores homogêneos para os três óxidos considerados. Observe-se que neste diagrama é representada em verdade apenas uma fração das cores do espaço RGB, uma vez que é condição inerente à representação que a soma dos valores seja sempre igual a 255.

A principal vantagem deste método é a pronta visualização das relações espaciais entre as amostras e suas tendências, o que não pode ser feito com os diagramas tradicionais. É ainda possível a sobreposição de *layers* distintos, como o mapa de amostras coletadas, as estruturas geológicas, os principais contatos ou outras feições julgadas interessantes pelo usuário e que possam auxiliá-lo na interpretação dos resultados.

Cabe ainda a ressalva de que se trata de um método visual e qualitativo, não sendo de forma puramente alguma substitutivo aos diagramas е tabelas tradicionais. Outra característica inerente é o método de interpolação utilizado, o que faz com que os limites das unidades geoquímicas assim definidas não coincidam necessariamente com os contatos geológicos observados, sendo estes últimos em geral mais bruscos. Finalmente, é muito importante a confiabilidade das amostras coletadas, uma vez que algumas anomalias podem ser definidas a partir de apenas uma amostra, em função da densidade de amostragem. Estas anomalias devem ser interpretadas com cautela, e se possível checadas com trabalhos de campo e novas amostragens.

Embora muitos diagramas ternários espaciais possam ser gerados, combinando-se todos os elementos e razões disponíveis, consideraram-se suficientes e indicados basicamente os mesmos utilizados por Galembeck (1991) em sua caracterização da faciologia da Intrusão Cabreúva, acrescentando-se outros com a inclusão da sílica, conforme abaixo indicados (na seqüência RGB: primeiro elemento em vermelho, segundo em verde e terceiro em azul):

- Diagrama 1 : CaO: K₂O : Na₂O (Foto 4.14);

- Diagrama 2: CaO : $(Na_2O + K_2O)$: Al_2O_3 (Foto 4.15);

- Diagrama 3: CaO :
$$(Na_2O + K_2O)$$
 : SiO₂ (Foto 4.16);

- Diagrama 4: Fe_{total} : Álcalis: MgO (Foto 4.17);

Sobre cada um destes diagramas foram plotados os *layers* do mapa geológico proposto por Galembeck (1991), das principais cidades e estradas da área e dos pontos de coleta das amostras utilizadas na construção da imagem.



Foto 4.14 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos. As áreas de maior potencial mineral são representadas em tons de azul, e os núcleos mais primitivos em vermelho.



Foto 4.15 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos. As áreas de maior potencial mineral são representadas em tons de verde, e os núcleos mais primitivos em amarelo a laranja.



Foto 4.16 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos. As áreas de maior potencial são representadas em tons de verde, e os núcleos mais primitivos em amarelo.



Foto 4.17 - Diagrama ternário-espacial de dados geoquímicos. As áreas de maior potencial são representadas em tons de verde, e os núcleos mais primitivos em amarelo a vermelho.

4.3.4.Discussões e conclusões

A análise dos dados de Galembeck (1991) forneceu as linhas básicas da evolução faciológica da Intrusão Cabreúva, que podem ser extrapoladas para toda a Suíte Itu. Desta forma, com a evolução dos fácies as seguintes tendências podem ser observadas:

- decréscimo do conteúdo relativo de CaO;

- aumento na razão (Na_2O/K_2O);

- aumento do conteúdo de SiO₂;

Estas observações são claras em processos de evolução de magmas graníticos, e podem ser seguramente utilizadas para a delimitação das porções mais evoluídas da Suíte, onde tendem a se concentrar os processos de alteração hidrotermal, com conseqüente formação de ocorrências minerais de interesse econômico.

A partir dos diagramas gerados, esta tendência evolutiva da Suíte Granítica pode ser visualizada espacialmente.

Os núcleos mais primitivos (ou menos evoluídos geoquimicamente) são marcados pelos conteúdos relativamente altos de Ca, Mg e Fe e por conteúdos relativamente baixos de Na, K e Si, sendo visualizados em tons mais avermelhados nos diagramas.

Os fácies mais evoluídos são marcados pelos tons de verde ou azul nos diagramas, e representam as áreas mais propícias para a prospecção mineral.

A partir dos diagramas espaciais e considerando-se a localização das amostras coletadas, a seguinte seqüência evolutiva (a partir do menos evoluído) poderia ser sugerida para a Suíte, mesmo sem informações adicionais:

- associação de melagranitóides (CB-8);
- fácies equigranular cinza claro fino (CB-1);
- fácies equigr. cinza claro fino a médio (CB-2);
- fácies porfirítico cinza (CA-2);
- fácies ou associação xenolítica (CB-7);
- fácies porfiróide róseo (CA-4);
- fácies equigranular róseo médio (CB-4);
- fácies equigranular róseo fino a médio (CB-3);
- o fácies equigranular róseo grosseiro (CB-5) é muito

complexo nos diagramas, e não há amostras coletadas no interior dos fácies porfirítico róseo (CA-3), porfirítico cinza com quartzo hexagonal (CA-1) e equi-inequigranular esbranquiçado (CB-6).

Esta proposta está muito próxima da apresentada por Galembeck (1991) após estudos mais aprofundados (Figura 3.3), os quais não foram ainda suficientes para a confirmação da relação entre muitos dos fácies considerados. Esta similaridade entre as propostas mais uma vez demonstra a propriedade deste método de visualização, o qual fornece resultados interpretativos imediatos e com boa confiabilidade.

A maior discordância entre a tendência evolutiva representada nos diagramas e a proposta de Galembeck (1991) diz respeito à colocação do fácies equigranular róseo fino a médio (CB-3), considerado no trabalho citado como mais antigo (?) que os equigranular róseo fácies equigranular róseo médio (CB-4), grosseiro (CB-5), equi-inequigranular esbranquiçado (CB-6)e (CB-7). Esta posição, associação xenolítica no entanto, é apresentada como dúbia pelo próprio autor, podendo estar embasada principalmente nas características texturais do fácies, e não em suas relações geoquímicas.

Este modelo evolutivo encontra ótima correspondência com as ocorrências minerais conhecidas na área, conforme apresentadas pelo IPT (1981). É importante ressaltar que estas ocorrências não foram em nenhuma etapa utilizadas como dados de entrada para o modelo, possuindo portanto grande valor para avaliação final dos resultados.

A ocorrência central na Intrusão Itupeva aparentemente estaria relacionada a um núcleo mais primitivo. A dificuldade de sua localização no campo não permitiu a realização de um cheque, não se descartando a possibilidade de um erro na localização a partir dos dados do relatório do IPT (1981), podendo a ocorrência estar em verdade um pouco deslocada para oeste.

4.4. DIAGRAMAS PREVISIONAIS

A análise direta as imagens aerogeofísicas e dos diagramas ternários espaciais a partir dos dados geoquímicos permite-nos uma boa visualização da diferenciação interna da Suíte Granítica, porém não é simples a determinação de áreas que apresentem características comuns que as credenciem como de maior potencial para a prospecção mineral.

Utilizando-se um Sistema Geográfico de Informações como o GRASS é possível não apenas a sobreposição de informações sob a forma de layers, mas também e sobretudo a fusão de dados de origem geração de novas distinta e a imagens, aqui denominadas de previsionais. Estes diagramas possuem diagramas um caráter especulativo, pois são função dos pesos atribuídos a cada uma das informações originais, sendo esta uma característica intrínseca muito importante no processo.

Sobre cada um dos diagramas previsionais gerados foram plotados os *layers* contendo as principais informações das cartas do IBGE em 1 : 10.000 e as principais ocorrências minerais conhecidas na área, conforme apresentadas pelo relatório do IPT (1981). Devese salientar que estas ocorrências somente foram utilizadas nesta fase final de avaliação, não tendo sido consideradas anteriormente na geração dos diagramas e/ou na concepção do modelo adotado.

Desta forma, o diagrama da Foto 4.18 foi gerado a partir dos dados geofísicos, atribuindo-se peso igual a 4 para as áreas ricas em potássio, peso igual a 2 para as áreas ricas em tório e peso igual a 1 para as áreas ricas em urânio, por ser este último o de mais difícil caracterização. O método de atribuição de pesos pela potência de 2 foi aqui selecionado para maior valorização dos dados de potássio, evitando-se a grande propagação dos ruídos no canal do urânio.



Foto 4.18 - Diagrama previsional construído a partir dos dados aerogeofísicos, atribuindo-se pesos de 4 para o potássio, 2 para o tório e 1 para o potássio. As áreas de maior potencial são representadas em vermelho, seguidas pelo violeta. As ocorrências citadas pelo IPT (1981) estão marcadas com um "x". A de número 1 corresponde à mina de Inhandjara, e a de número 2 à Pedreira Tocantins.

Pode-se observar que na categoria de mais alta prioridade prospectiva são encontradas 3 das 7 ocorrências descritas, numa área correspondente a 23.87 % da área total da Suíte. Se considerarmos as duas categorias com maior prioridade, o índice de acertos passa a 5 ocorrências em 7, com uma área correspondente a 47,18 % do total da Suíte.

As duas ocorrências não "prospectáveis" pelo diagrama são externas à Suíte (incluindo a mina de exogreisens de Inhandjara, a leste de Itupeva), e não há evidências locais de condicionamento estrutural com forte remobilização de potássio, ao

contrário do que pode ser claramente observado na ocorrência a sul de Itu, controlada pelo falhamento WNW conforme ilustra a Foto 4.10, de razão potássio/tório.



Foto 4.19 - Diagrama previsional construído a partir dos dados geoquímicos, atribuindo-se pesos de 0 a 4 para as áreas de maior potencial de cada diagrama. As áreas de maior potencial mineral são representadas em vermelho, seguidas pelo violeta. As ocorrências citadas pelo IPT (1981) estão marcadas com um "x". A de número 1 corresponde à mina de Inhandjara, e a de número 2 à Pedreira Tocantins.

O diagrama da Foto 4.19 foi gerado atribuindo-se pesos variando entre 0 e 4 para cada diagrama geoquímico, de acordo com a maior ou menor probabilidade de ocorrência mineral em função do modelo adotado. Neste diagrama, a categoria de prioridade máxima corresponde a apenas 7,21 % da área total da Suíte, atingindo-se um índice de "acerto" de 4 ocorrências em 7 possíveis.



Foto 4.20 - Diagrama previsional geral, construído a partir dos dados geoquímicos e geofísicos. As áreas de maior potencial mineral são representadas em vermelho, seguidas pelo verde. As ocorrências citadas pelo IPT (1981) estão marcadas com um "x". A de número 1 corresponde à mina de Inhandjara, e a de número 2 à Pedreira Tocantins.

Finalmente, o diagrama previsional da Foto 4.20 foi gerado pela fusão dos diagramas geofísicos e geoquímicos. Nele, a categoria de máxima prioridade corresponde a apenas 4,07 % da área interna à Suíte e engloba 3 das 7 ocorrências, incluindo a de maior porte (Pedreira Tocantins). Se considerarmos as duas categorias de maior prioridade, atingimos um índice de acertos de 5 ocorrências em 7, com uma área de apenas 15,86 % do total. Na pior combinação possível, o índice de acertos sobe a 100 % numa área de 54,67 % do total da Suíte.

A Tabela 4.2 resume o número de categorias possíveis, os índices de acerto e a porcentagem em área correspondente em cada diagrama descrito.

Diagrama	Dados Utilizados	Acertos	<pre>% em Área da Suíte</pre>
4.18	geofísicos	3/7	23.87
		5/7	47.18
4.19	geoquímicos	4/7	7.21
4.20	geoquímicos e geofísicos	3/7	4.07
		5/7	15.86
		7/7	54.67

Tabela 4.2 : Resumo de "acertos" dos diagramas previsionais, considerandoas as ocorrências citadas pelo IPT (1981).

Deve ser feita a ressalva de que para os diagramas previsionais que se utilizam de dados geoquímicos as ocorrências externas à Suíte na realidade não poderiam ser consideradas para a avaliação dos resultados, uma vez que não foram coletadas amostras nestas áreas.

Os resultados obtidos através destes diagramas são, no entanto, considerados bastante positivos, e mostram a viabilidade da utilização deste método para a determinação de áreas para a prospecção mineral.

5. PROCESSAMENTO DIGITAL DAS IMAGENS LANDSAT

5.1.INTRODUÇÃO

Neste capítulo é feito o processamento digital das imagens Landsat, utilizando-se tanto as técnicas tradicionais quanto o novo algoritmo proposto para a caracterização textural de imagens.

Os resultados obtidos pela aplicação de cada técnica são apresentados ao lado de breves comentários para sua comparação com os mapas geológicos disponíveis e com os diagramas previsionais obtidos no capítulo anterior.

5.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS IMAGENS

Neste trabalho foi utilizado um conjunto de imagens Landsat TM, órbita 219.76 quadrante W, azimute de 53° e elevação solar de 39°, de 25/08/1987.

O mês de agosto se caracteriza por ser um período seco na área estudada, o que elimina o problema de cobertura por nuvens e diminui a interferência da vegetação. Além disso, as áreas de estão preparação do solo, em fase de expondo-o plantio е melhor possibilitando caracterização do substrato uma por intermédio de imagens de sensores remotos.

O processamento digital das imagens Landsat foi realizado em ambiente UNIX em estações de trabalho Sun, com o *software* da **I2S** disponível no LAPIG. Este processamento teve início com a análise visual e estatística de cada uma das bandas originais (excetuando-se a banda termal), procurando-se reconhecer as principais feições por elas realçadas na área de estudo.

Do ponto de vista estatístico, as seguintes características básicas destas imagens devem ser consideradas:

- a banda 5 é a que possui maior variância;

- a banda 7 é a que possui maior coeficiente de variação (desvio padrão/média);

- as bandas 1,2 e 3 são as de maior correlação entre si;

- a banda com menor correlação com as demais é a 4;

Feito o reconhecimento inicial de cada uma das bandas, passou-se ao processamento digital propriamente dito.

O corte da imagem foi feito de maneira a cobrir a área correspondente à Suíte Itu, conforme mapeada por Pascholati (1990) e Galembeck (1991). A correção da distorção geométrica foi feita utilizando-se 13 pontos de controle de coordenadas bem conhecidas retiradas das cartas 1:10.000 do IBGE. O erro médio obtido foi de 0.3 pixels na direção NS e 0.4 pixels na direção EW, um resultado considerado muito bom. A imagem final corrigida tem dimensões de 1024 x 1024 pixels.

5.3.ANÁLISE ESTRUTURAL

Optou-se pela análise visual, com traçado gráfico manual via **I2S** banda a banda, somando-se todos os lineamentos fotointerpretados num único arquivo final, conforme proposto por Offield *et al.* (1977). A primeira componente principal foi também utilizada, não havendo nenhuma contribuição significativa de novos lineamentos não interpretáveis diretamente das bandas originais.

Os filtros direcionais não forneceram nenhuma informação adicional, tendo como função única o realce de lineamentos existentes. Como revés, aumentam o número de artefatos, razão pela qual foram mantidos os dados obtidos diretamente das bandas (Foto 5.1).

Em comparação com os mapas geológicos propostos por Pascholati (1990) e Galembeck (1991), esta análise visual direta apresentou resultados satisfatórios: todos os grandes lineamentos estão bem marcados nas imagens, assim como outros menores indicados como inferidos nos mapas.

As falhas da Fonte, da Cachoeira, de Itaguá, Piraí e Cururu são prontamente identificadas, sendo que seus trechos mais descontínuos na imagem estão corretamente indicados nos mapas como inferidos.

Os lineamentos menores no interior dos Granitos Salto e Cabreúva não correspondem exatamente aos apresentados nos mapas, porém os sistemas principais são preservados. Deve-se ressaltar que

muitos dos lineamentos apresentados nos mapas foram interpretados a partir de fotografias aéreas, de resolução espacial muito superior às imagens Landsat.



Foto 5.1 : Principais lineamentos estruturais extraídos por fotointerpretação das imagens Landsat TM.

Há um grande número de lineamentos NNE não presentes no mapa de Galembeck (1991), incluindo-se a Falha de Inhandjara proposta por Pascholati (1990) e outras a ela paralelas igualmente de grande extensão. O realce destes lineamentos foi favorecido pelo azimute e ângulo de elevação das imagens, possuindo caráter marcante. Sua possível associação às ocorrências minerais da área e ao contato oriental da Suíte Granítica devem ainda ser considerados.

Finalmente, os limites dos granitos Fazenda Japão e Fazenda Cruz Alta, conforme propostos por Pascholati (1990), são em verdade marcados por grandes lineamentos, porém não há qualquer característica tonal ou textural que corrobore sua individualização em corpos distintos, parecendo-nos mais apropriada a denominação de Granito Cabreúva de Galembeck (1991) para o corpo como um todo.

5.4.COMPOSIÇÕES COLORIDAS

As composições coloridas podem ser utilizadas segundo dois objetivos básicos (e não coincidentes): separação dos três grandes domínios e/ou maior discriminação da variabilidade interna à Suíte Granítica.

Para o primeiro objetivo, muito mais simples, a escolha óbvia seria selecionar as três bandas que individualmente já permitem uma separação dos domínios. Segundo esta capacidade, a seguinte ordem foi observada, da melhor para a pior: 3,1,2,7,5,4.

A combinação imediata é, portanto, entre as bandas 1,2 e 3, possivelmente a cor real (TM 321, em RGB).

De fato, com esta combinação (Foto 5.2) pode-se diferenciar a porção da Bacia do Paraná a oeste, com cores mais claras, concentração das áreas urbanas (Salto, Itu e Indaiatuba) e textura mais lisa. Na porção central destaca-se a Suíte Granítica, com grandes falhamentos marcados pela vegetação em cor escura e ocupação antrópica mais incipiente. A leste o domínio do Complexo Itapira é marcado por uma textura mais rugosa, separando-se da porção granítica notadamente por um forte lineamento NNE. Os limites entre estes domínios são, naturalmente, pouco nítidos.

No Granito Itupeva, a grande mancha de embasamento indicada no mapa de Pascholati é marcada pela maior ocupação agrícola, em contraste com as áreas mais preservadas devido à presença de matacões e solo pobre derivado do granito. A pedreira Tocantins, ocorrência maior do hidrotermalismo da área, aparece como uma área branca ao lado de uma mancha de mata preservada. Ainda que as áreas graníticas possam ser diferenciadas das áreas de embasamento, devido à sua textura e à ocupação diferenciada, o reconhecimento de fácies dentro do granito é uma tarefa praticamente impossível.

O Granito Salto é de difícil reconhecimento, devido à ausência de grandes estruturas internas e ao seu recobrimento pelos sedimentos glaciogênicos a norte e oeste. O nível mais profundo de erosão, conforme proposto por Pascholati (1990), pode também ser responsável pela atenuação das feições mais distintivas na imagem, onde apenas os contornos a leste e a sul são mais claros e marcados por lineamentos.



Foto 5.2 : Combinação RGB das bandas TM 321 ("cor real").

Não são observáveis na imagem feições distintivas que permitam a separação do Granito Fazenda Cruz Alta, de Pascholati (1990). Ainda que este seja cortado pela Falha de Itaguá, no que seria seu limite oriental, parece haver continuidade lateral constituindo o denominado granito Cabreúva, de Galembeck (1991).

Os fácies interiores ao Granito Cabreúva não podem ser individualizados nesta combinação de bandas, não havendo correspondência observada entre as diferenças de densidade vegetal e estes fácies, nem com as áreas selecionadas como de maior potencialidade mineral.

O denominado Granito Indaiatuba, de Galembeck (1991), aparece como uma área um pouco mais difusa entre as intrusões Itupeva e Cabreúva. Este aspecto é provocado pela "invasão" da Bacia pelo flanco oeste, possibilitando o desenvolvimento de maior ocupação humana.

A combinação "cor real" não é, no entanto, a melhor para os objetivos pretendidos, sendo utilizada mais por motivos históricos. Outra combinação comum é a denominada "falsa cor", onde a banda com maior informação vegetal é posta no canal do vermelho (TM 432, Foto 5.3).



Foto 5.3 : Combinação RGB das bandas TM 432 ("falsa cor"). O destaque é dado às áreas de vegetação densa (em vermelho) e às áreas urbanas má azul). Os fortes lineamentos a sul são bem realçados.

Diante do grande número de combinações possíveis entre bandas, procurou-se determinar o melhor triplete para a otimização das informações, segundo o conceito de Kaufmann & Pfeiffer (1988). O cálculo do determinante de Sheffield (1985), que visa maximizar a informação radiométrica através do elipsóide no espaço amostral de maior volume, forneceu as seguintes combinações preferenciais:

TM 3,5,4 (det = 1.228.164)
TM 7,5,4 (det = 882.498)
TM 4,5,1 (det = 709.760)
TM 4,5,2 (det = 371.013)
TM 7,5,3 (det = 365.781)
TM 3,7,4 (det = 253.021)

As combinações "cor real" e "falsa cor" são, por este método, consideradas muito ruins (respectivamente com determinantes de 1.373 e 13.197).

O método de análise dos "auto-vetores" proposto por Mausel *et al.* (1990) recomenda as bandas 4,2,5 e 7 para a classificação e a análise por componentes principais. Numa extensão do conceito, poderiam ser utilizadas também para as combinações coloridas, segundo os tripletes 452, 472, 754 e 752.

Com efeito, as combinações 354 (Foto 5.4), 754 (Foto 5.5) e 472 (Foto 5.6) são boas para maximizar a informação, fornecendo imagens onde a ocupação urbana, a vegetação e a hidrografia aparecem com nitidez. No entanto, nas porções internas à Suíte Granítica as diferentes feições realçadas por cores distintas não correspondem aos fácies mapeados por Galembeck (1991).



Foto 5.4 : Combinação RGB das bandas TM 354, indicada pelo determinante de Sheffield (1985).



Foto 5.5 : Combinação RGB das bandas TM 754, a partir de Mausel et al. (1990).



Foto 5.6 : Combinação RGB das bandas TM 472, a partir de Mausel et al. (1990).

Como principal revés, estas combinações não permitem a delimitação dos grandes domínios litológicos da área. Foram então testadas as combinações 372 (Foto 5.7) e 572 (Foto 5.8), as quais aliam as seguintes características consideradas positivas:

- pelo menos duas bandas onde a delimitação dos grandes domínios é possível;

- pelo menos uma banda com informações radiométricas de uma faixa de interesse (banda 7, associada a alterações hidrotermais);

- ausência de "sobrecarga" de informação da vegetação (provocada pela banda 4).

As imagens resultantes foram consideradas muito boas, atingindo-se um equilíbrio entre os objetivos de separação da Suíte Granítica (para o qual a combinação 321 parece ser superior, porém implica em redundância de informações devido à alta correlação entre as bandas) e a maximização da informação.


Foto 5.7 : Combinação RGB das bandas TM 372. A Suíte Granítica é distinta, mantendo-se uma boa diversidade interna e evitando a sobrecarga da vegetação.



Foto 5.8 : Combinação RGB das bandas TM 572. A Suíte Granítica é distinta, mantendo-se uma boa diversidade interna e evitando a sobrecarga da vegetação.

Não obstante, não foi observada ainda nenhuma correlação entre a diversidade apresentada pela imagem e os fácies graníticos, nem com as áreas consideradas potencialmente favoráveis para ocorrências minerais mais expressivas.

5.5.RAZÕES DE BANDAS

A técnica de razões de bandas é a mais utilizada para realce de comportamentos espectrais distintos, tendo-se obtido bons resultados na delimitação de zonas de alteração hidrotermal e de óxidos de ferro, particularmente em áreas semi-áridas.

Em regiões de clima tropical úmido, a principal utilização deve ser de realce de diferenças de cobertura vegetal (intensidade e diversidade), procurando-se associar estas diferenças a possíveis variações litológicas, o que nem sempre é real.

Para uma avaliação dos problemas apontados por Crippen (1988), foi utilizada a técnica de subtração do pixel escuro em confronto com a razão direta. As diferenças observadas entre as imagens produto são sutis, porém há realmente ruídos na razão direta que são diminuídos na razão com subtração do pixel escuro, motivo pelo qual optou-se pelo segundo procedimento.

Os valores mínimos subtraídos foram definidos pela estatística básica banda a banda.

A diferenciação entre os fácies e o realce das áreas alvo deve ser baseada na diferente cobertura vegetal, na maior ou menor concentração de óxidos de ferro e de argilo-minerais, estes últimos associados frequentemente a processos de alteração hidrotermal.



Foto 5.9 : Razão de bandas TM 4/3. As áreas urbanas aparecem em tons escuros, e a vegetação em tons mais claros.



Foto 5.10 : Razão de bandas TM 3/1. As áreas urbanas e limoníticas aparecem em tons claros, e a vegetação em tons mais escuros.



Foto 5.11 : Razão de bandas TM 5/7. As áreas urbanas aparecem em tons escuros, e a vegetação e áreas de alteração hidrotermal em tons claros.

As razões TM 4/3 (Foto 5.9), 3/1 (Foto 5.10) e 5/7 (Foto 5.11) foram empregadas para caracterizar cada um destes fenômenos, e mais uma vez se mostraram infrutíferas para a área em estudo. A ausência de grandes extensões de hidrotermalismo, a vegetação uniforme sobre os vários fácies (cuja alteração se deve principalmente a fatores antrópicos) e a ausência de crostas limoníticas não permitem, assim, nenhuma correlação entre as novas imagens e as áreas alvo.

As informações individuais de cada razão são somadas em uma composição colorida (Foto 5.12), porém ainda assim nenhuma correlação se fez possível.



Foto 5.12 : Composição colorida RGB das razões de bandas 5/7, 4/3 e 3/1. Áreas urbanas em azul, vegetação em amarelo e água em vermelho. Não são distintas áreas de alteração hidrotermal ou crostas limoníticas, nem há correlação com os fácies graníticos mapeados.

5.6.COMPONENTES PRINCIPAIS

A técnica de componentes principais foi aplicada sobre a imagem TM para todas as bandas, excetuando-se a termal, resultando assim em seis novas imagens com informação radiométrica decorrelacionada. Para suavização dos ruídos, presentes principalmente nas componentes finais, foi aplicado um filtro do tipo "passa baixas" de dimensões 5 x 5 pixels. Para acompanhamento das discussões, a matriz de correlação entre as bandas e a tabela de auto-valores e auto-vetores são apresentadas a seguir.

Banc	la	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
TM	1	1.000	0.894	0.839	0.259	0.675	0.730
TM	2	0.894	1.000	0.946	0.353	0.780	0.816
ΤM	3	0.839	0.946	1.000	0.277	0.820	0.872
ΤM	4	0.259	0.353	0.277	1.000	0.388	0.235
TM	5	0.675	0.780	0.820	0.388	1.000	0.928
ΤM	7	0.730	0.816	0.872	0.235	0.928	1.000

Tabela 5.1 - Matriz de correlação entre as bandas da imagem Landsat TM.

	auto		auto vetores				
	valor	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
PC 1	0.881	0.133	0.130	0.270	0.106	0.844	0.411
PC 2	0.062	0.094	0.042	0.191	-0.920	-0.116	0.305
PC 3	0.039	0.459	0.364	0.620	0.285	-0.421	0.120
PC 4	0.011	-0.274	-0.161	-0.189	0.243	-0.312	0.841
PC 5	0.006	-0.783	-0.020	0.609	0.004	-0.007	-0.126
PC 6	0.001	0.274	-0.907	0.316	0.043	0.002	-0.026

Tabela 5.2 - Auto-valores e auto-vetores da imagem Landsat TM.

Estas componentes principais não mostraram ainda qualquer correlação direta com os fácies graníticos e/ou com as áreas alvo, o que de certa forma era já esperado em virtude dos resultados obtidos com a aplicação das outras técnicas.

Uma composição colorida entre as componentes 1,3 e 5 (Foto 5.13) exibe uma boa diversidade de cores, e grosso modo podese isolar a área da Bacia em tons predominantemente esverdeados, a área granítica com tons avermelhados e a área de embasamento com predomínio de tons azuis. Os limites entre estes domínios são, no entanto, bastante difusos.



Foto 5.13 : Composição colorida RGB das componentes principais 135. A área da Bacia do Paraná apresenta tons mais amarelados, mas não há boa separação dos fácies graníticos.

A análise dos auto-vetores, segundo o método de FPCS (discutido por Crósta, 1990), indicou que a informação referente à cobertura vegetal se concentra na segunda componente principal, a informação referente à alteração hidrotermal se concentra na quarta componente principal e a informação referente aos óxidos de ferro se concentra na quinta componente principal. A composição colorida destas componentes (Foto 5.14) não possibilitou ainda o reconhecimento de nenhuma correlação com os fácies graníticos e/ou com as áreas alvo.



Foto 5.14 : Composição colorida RGB das componentes principais 254, indicada ela análise dos auto-vetores.

5.7. INTEGRAÇÃO DE DADOS PELO USO DO ESPAÇO IHS

A decorrelação pelo IHS (Intensidade, Tom e Saturação) para aumento de contraste e diversificação de cores não forneceu bons resultados, sendo a técnica bastante mais efetiva no caso estudado para a integração com os dados aerogeofísicos.

Para tanto, a primeira componente principal das bandas TM foi colocada no canal H, a primeira componente principal dos dados aerogeofísicos foi colocada no canal I, e uma imagem monocromática de DN 150 de mesmas dimensões foi criada para o canal S. A conversão desta imagem para o sistema RGB gerou a imagem apresentada nas fotografias 5.15 e 5.16, onde são aliadas as informações texturais da imagem TM com as informações de radiometria dos canais aerogeofísicos.



Foto 5.15 : Imagem composta pelo espaço HSI e reconvertida para o RGB, integrando os dados aerogeofísicos e as informações das bandas Landsat TM. A Suíte Granítica é bem delimitada.



Foto 5.16 : Detalhe da foto anterior, com destaque para a porção norte da Suíte (Granito Itupeva).

Esta imagem foi considerada bastante útil para a delimitação da Suíte Granítica, permitindo ainda uma boa localização de campo e a identificação de área de maior potencial mineral associadas às áreas com maiores valores de radioatividade natural.

Pode-se ainda observar que há uma nítida correlação entre os grandes falhamentos presentes e as maiores anomalias geofísicas, o que é indicativo da atividade hidrotermal com enriquecimento de potássio nestas estruturas. O efeito de atenuação pela vegetação, embora certamente presente, não é intenso o suficiente para causar o mascaramento de áreas anômalas, como pode ser deduzido a partir dos altos valores observados mesmo sobre a grande mancha de mata preservada a noroeste de Itupeva.

Muito embora não seja aqui obtida nenhuma correlação com os fácies graníticos mapeados, esta imagem de integração de dados se mostra bastante mais útil que todas as demais obtidas até agora com as diversas técnicas de processamento digital.

Para localização de campo e orientação dos trabalhos de prospecção os diagramas previsionais podem ser integrados às imagens Landsat pela mesma técnica.

5.8. CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS

Uma vez que já foi demonstrado anteriormente que o processamento radiométrico das imagens não possibilita o reconhecimento da diversidade interna da Suíte Granítica, nem a determinação de áreas alvo para a prospecção mineral definidas pelo processamento dos dados geofísicos e geoquímicos, não se deve esperar nenhum resultado positivo pela técnica de classificação.

Com efeito, o resultado de uma classificação não supervisionada não permite a separação de nenhum dos alvos ou fácies procurados, nem mesmo define grandes áreas homogêneas que permitam o direcionamento de classificações supervisionadas.

A aplicação do algoritmo para a geração das bandas texturais poderia acrescentar informações que possibilitariam uma melhora deste processo classificatório, porém cabem aqui duas questões básicas a serem resolvidas: como selecionar a banda com melhor informação textural intrínseca (uma vez que a geração de bandas texturais indiscriminadamente geraria um número de dados muito grande, e o processamento e seleção destes dados nem sempre seria tarefa simples), e qual a dimensão da janela móvel para o cálculo dos variogramas ?

A banda TM 7 foi selecionada para a geração das bandas texturais, por abranger a faixa do espectro que caracteriza as áreas de alteração hidrotermal e por possuir o maior coeficiente de variação, o que pode (mas não necessariamente) ser indicador de uma boa variabilidade textural. Os valores de variância são dependentes em intensidade dos DN empregados no cálculo, sendo o coeficiente de variação considerado mais indicado para uma estimativa de variabilidade por haver uma normalização pela média. Nenhum destes índices, no entanto, possui sensibilidade espacial.

A dimensão da janela móvel foi definida pela construção de variogramas em texturas bem definidas, no caso as áreas urbanas e porções graníticas, independentemente dos fácies. Estes variogramas mostraram uma importante estrutura em cinco pixels, de forma que foram utilizadas janelas móveis com dimensões quadradas de 6 pixels e geradas cinco bandas texturais, cada uma delas correspondente a um passo do variograma.

Como resultado final, temos portanto uma imagem com seis bandas radiométricas e cinco bandas texturais, sendo sobre esta imagem composta aplicadas as classificações supervisionadas descritas a seguir.

5.8.1.Classificação supervisionada pelos fácies

Nesta classificação foram selecionadas nove áreas de treinamento, de forma iterativa sobre o mapa proposto por Galembeck (1991): Granito Itupeva, Granito Salto, Granito Indaiatuba, Granito Cabreúva (fácies porfiróide róseo, equigranular róseo médio e equigranular róseo grosseiro), sedimentos da bacia e embasamento, além de uma classe relativa à área urbana. Estas áreas foram selecionadas de forma a evitar espessa cobertura vegetal, por motivos já discutidos anteriormente.



Foto 5.17 : Classificação por maxver sobre as bandas TM originais. As áreas de treinamento foram definidas a partir do mapa geológico proposto por Galembeck (1991).



Foto 5.18 : Mesmo algoritmo anterior, agora considerando todas as bandas Landsat TM e as cinco bandas texturais calculadas pela variografia sobre a banda TM 7. Sobreposto, vetor do mapa de Galembeck (1991).

Uma vez definidas estas áreas, foi aplicado o algoritmo de classificação supervisionada por máxima verossimilhança sobre a imagem Landsat somente com as bandas radiométricas originais (Foto 5.17) e sobre a imagem composta com as bandas texturais (Foto 5.18), para comparação dos resultados. Estas figuras foram submetidas a um filtro de medianas ("passa-baixas") de 5 x 5 pixels.

A análise visual das imagens nos permite de imediato uma série de conclusões, mesmo antes de avaliarmos as relações numéricas entre elas:

- a classificação utilizando todas as onze bandas (seis radiométricas e cinco texturais) é bem mais rigorosa, o que leva a um número muito maior de pixels não classificados, dentro do mesmo intervalo de confiança adotado. De fato, nesta imagem o número de pixels não classificados corresponde a 63 % do total, contra 42 % na classificação puramente radiométrica;

 - a área urbana é bem diferenciada em ambas as imagens (realce em amarelo), porém na classificação "global" os contornos dos núcleos mais densamente urbanizados são mais nítidos;

 na classificação por bandas radiométricas há maior confusão das áreas graníticas com as áreas de embasamento, o que nitidamente diminuído na classificação "global";

- em ambas as imagens as áreas mais densamente vegetadas não foram classificadas, função de suas características radiométricas fortemente distintas;

- em nenhuma das imagens há distinção entre os fácies graníticos propostos.

A escolha de uma ou outra imagem pode parecer um critério pessoal, daí ser necessária a adoção de algum índice para a avaliação do real ganho na classificação utilizando as bandas texturais. A proposta é a de utilizarmos as próprias áreas de treinamento para aferir a metodologia, medindo-se seus índices de "acertos" (número de pixels dentro da área de treinamento corretamente classificados), "rejeição" (número de pixels dentro da área de treinamento não classificados dentro do limite de confiança

estabelecido) e "erros" (número de pixels dentro de uma área de treinamento e "erroneamente" classificados como pertencentes a outra categoria).

Estes índices são, é claro, apenas qualitativos, pois devemos lembrar da possibilidade de pixels de categorias diferentes terem sido em realidade incluídos em uma mesma área de treinamento, por problemas de amostragem na imagem ou incorreta delimitação das categorias no campo.

Como o algoritmo disponível no sistema 600/I2S permite uma filtragem dos pixels das áreas de treinamento, os mesmos índices foram recalculados para a imagem final, conforme ilustram as Tabelas 5.3 e 5.4 .

	ace	ertos	r	ejeição	índice de	"erro"
categoria	DN	total	DN	total	DN	total
cidade	58 %	48 %	7.9 %	16 %	34.1 %	36 %
Itupeva	0.5 %	0.9 %	4.9 %	8.8 %	94.6 %	90.3 %
Indaiatuba	19.2 %	8.6 %	11.6 %	16.5 %	69.2 %	74.9 %
Salto	3.2 %	17 %	3.8 %	4.5 %	93.0 %	78.5 %
fácies CB5	20.7 %	78	4.6 %	14.9 %	74.7 %	78.1 %
fácies CB4	3 %	1.8 %	3.9 %	6 %	93.1 %	92.2 %
fácies CA4	10.5 %	43.7 %	9.6 %	4.8 %	79.9 %	51.5 %
Bacia	60 %	45.6 %	18 %	33.6 %	22.0 %	20.8 %
Pré-C.	30.3 %	14.1 %	10.5 %	29.6 %	59.2 %	56.3 %
Geral	23.3 %	21.4 %	8.3 %	16.2 %	68.4 %	62.4 %

Tabela 5.3: Índices de acerto calculados sobre as áreas de treinamento sobre as imagens radiométrica (6 bandas originais) e composta (11 bandas).

	ace	ertos	re	ejeição	índice de	"erro"
categoria	DN	total	DN	total	DN	total
cidade	77.2 %	45.9 %	18.1 %	53.9 %	4.7 %	0.2 %
Itupeva	25 %	0 8	0 %	0 8	75 %	100 %
Indaiatuba	40.4 %	27.9 %	8.1 %	52.4 %	51.5 %	19.7 %
Salto	4.2 %	50.8 %	0 %	34.5 %	95.8 %	14.7 %
fácies CB5	47.6 %	33.5 %	3 %	32.4 %	49.4 %	34.1 %
fácies CB4	14.9 %	21.4 %	0 %	10.7 %	85.1 %	67.9 %
fácies CA4	43.5 %	48.7 %	1.9 %	39.3 %	54.6 %	12 %
Bacia	87.6 %	44.7 %	12.4 %	55.3 %	0 %	0 %
Pré-C.	54.2 %	44.0 %	11.7 %	45.4 %	34.1 %	10.6 %
Geral	66.7 %	44.9 %	11.2 %	46.6 %	22.1 %	8.5 %

Tabela 5.4 : Índices de acerto calculados sobre as áreas de treinamento sobre as imagens radiométrica (6 bandas originais) e composta (11 bandas), após a filtragem pelo algoritmo dos pixels mal classificados.

A análise destas tabelas mostra que, embora a princípio possa parecer que houve inclusive piora na classificação, já que o índice de acertos para a imagem total é menor que o mesmo índice para a imagem puramente radiométrica, o que ocorre em verdade é um grande rigor do método, que aumenta o número de pixels não classificados e diminui drasticamente o índice de pixels mal classificados.

Desta forma, observamos que as áreas classificadas como Bacia Sedimentar, Áreas Urbanas, Embasamento e Fácies CA4 possuem um índice de erro máximo de 10 %, o que torna a confiabilidade desta classificação bastante alta.

Por outro lado, vemos que não é possível separar os outros fácies graníticos, pois suas características radiométricas e texturais não são distintivas. Isso fica muito bem caracterizado pelos elevados índices de erro obtidos nos processos de classificação.

Outra observação interessante é a de que o índice de acertos do Granito Salto aumenta consideravelmente com a inclusão das bandas texturais. Coincidência ou não, este granito possui como característica mais importante uma textura *rapakivi* bem desenvolvida.

5.8.2.Classificação supervisionada por diagramas previsionais

Uma segunda classificação supervisionada foi realizada com o objetivo de procurar na imagem áreas radiométrica e texturalmente semelhantes às áreas tidas como de maior potencial para ocorrências minerais de interesse econômico, conforme definidas no capítulo anterior.

Para tanto, uma única área de treinamento foi selecionada a partir do diagrama previsional final, e a imagem classificada terá duas categorias, de acordo com seu caráter positivo ou negativo dentro do intervalo de confiança adotado.

A classificação da imagem TM original (Foto 5.19), já com um filtro de medianas 5 x 5, fornece uma área muito grande com características consideradas positivas, isto é, praticamente toda a Suíte Granítica e boa parte do embasamento são classificados como potencialmente favoráveis às ocorrências de mineralizações. Obviamente este resultado não é satisfatório, e não permite nem mesmo a correta delimitação das intrusões graníticas.

Se considerarmos a imagem composta, incluindo as bandas texturais, o resultado é bem diferente: as áreas classificadas como potencialmente favoráveis correspondem apenas a uma pequena porcentagem da imagem total, porém o número de acertos em relação às ocorrências realmente conhecidas é baixo, conforme ilustra a Foto 5.20.



Foto 5.19 : Classificação por maxver sobre as bandas originais, com uma área de treinamento a partir do diagrama previsional composto. Em vermelho, o vetor do mapa geológico de Galembeck (1991).



Foto 5.20 : Mesmo algoritmo anterior, incluindo as bandas texturais. A área indicada como potencial é bem menor, mas o número de "acertos" é pequeno, conforme as ocorrências citadas pelo IPT (1981).

Como teste final da possibilidade de prospecção a partir das imagens Landsat e de suas bandas texturais derivadas, na presente área de estudo, uma terceira classificação supervisionada foi feita com uma única área de treinamento sobre a ocorrência da Pedreira Tocantins (a de número 2 nas figuras apresentadas). Teoricamente, se existem características radiométricas

e/ou texturais que permitam o reconhecimento das ocorrências minerais da área, então uma área de treinamento sobre a maior delas deverá permitir a classificação de todas as demais (ou pelo menos da maior parte delas) como potencialmente favoráveis.

O resultado desta classificação é apresentado na Foto 5.21, onde mais uma vez nota-se que o número de acertos foi mais baixo e a porcentagem em área mais alta que os obtidos para os diagramas previsionais a partir dos dados geofísicos e geoquímicos.



Foto 5.21 : Classificação por maxver sobre a imagem total, com uma área de treinamento sobre a ocorrência da Pedreira Tocantins (indicada como número 2).

Concluindo, não foram identificadas características radiométricas e/ou texturais comuns às ocorrências minerais descritas na Suíte Intrusiva de Itu, não sendo portanto possível sua pronta classificação a partir do algoritmo proposto.

A intensa ocupação antrópica da área, a inexistência de extensas porções de alteração hidrotermal e a não correspondência das texturas faciológicas com feições em grande escala foram os principais fatores que levaram à ineficiência de todas as técnicas de processamento digital de imagens aqui utilizadas.

Neste quadro, as informações aerogeofísicas se mostraram bastante úteis, e seu uso de forma integrada com outras informações disponíveis é portanto fortemente recomendada.

6. DISCUSSÕES, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

No balanco final dos trabalhos realizados ρ dos resultados enfoques obtidos dois distintos devem ser bem individualizados: a avaliação das técnicas empregadas, seus conceitos e potencial de uso, e o resultado prático observado para a área da Suíte Intrusiva de Itu.

Desta forma, não devemos confundir um resultado prático negativo ou não plenamente satisfatório com a ineficiência total da técnica, uma vez que outros fatores de igual importância precisam ser considerados, tais como a qualidade dos dados disponíveis e a necessidade de pesquisas adicionais para aprimoramento dos procedimentos.

6.1.Resultados obtidos para a área da Suíte Intrusiva de Itu

A análise da bibliografia disponível, as etapas de campo e o estudo da principal ocorrência mineral interna à Suíte Granítica de Itu (Pedreira Tocantins, a noroeste de Itupeva) permitiram a formulação de um modelo prospectivo para a área baseado na evolução de um magma granítico e nos processos de alteração hidrotermal a ele associados.

Desta forma, foram consideradas como de maior potencial econômico as áreas de fácies mais evoluídos, com enriquecimento em álcalis, voláteis e elementos incompatíveis (incluindo os radioativos) e empobrecimento em ferro, cálcio e magnésio. A percolação de fluidos por fraturamentos no corpo em estágio de resfriamento é favorecida pelo elevado conteúdo de elementos radioativos, principalmente no Granito Itupeva, possibilitando a geração de novas concentrações minerais de interesse econômico.

Os dados geoquímicos disponíveis permitiram a geração de diagramas ternário-espaciais a partir dos quais obteve-se pronta visualização da evolução espacial da Suíte Granítica, sendo inclusive possível a interpretação de uma sequência de evolução dos fácies bastante próxima da anteriormente apresentada, esta embasada em métodos mais específicos e demorados, mas que também não se mostraram definitivos em virtude da insuficiência de dados de relações de campo.

As imagens de dados aerogeofísicos foram geradas a partir dos dados dos perfis do aerolevantamento, discutindo-se as questões do *aliasing* e das dimensões dos pixels a serem interpolados.

Utilizando-se o método de curvaturas mínimas, foram geradas imagens interpoladas diretamente dos dados originais e imagens interpoladas a partir dos dados filtrados em perfil para eliminação das altas frequências. A comparação destas imagens para a Suíte Intrusiva de Itu mostrou que a utilização das primeiras pode ser plenamente satisfatória, mantendo-se firmes critérios de interpretação das anomalias. As imagens filtradas não acrescentaram nenhuma informação julgada importante, e implicam necessariamente na perda de informação local.

Os diagramas previsionais obtidos pelo Sistema Geográfico de Informações a partir das imagens geoquímicas e geofísicas reduzem sensivelmente a área de prospecção, mantendo-se um bom nível de acertos em comparação com as ocorrências associadas à Suíte citadas na literatura. No diagrama misto, obteve-se um índice de acertos de 3 ocorrências em 7 para uma área de apenas 4 % do total de exposição da Suíte. Este índice sobe para 5 ocorrências em 7 para uma área de 16 % do total.

O processamento digital das imagens Landsat não apresentou bons resultados, no que concerne à identificação dos fácies graníticos mapeados e na caracterização radiométrico/textural das principais ocorrências minerais da área.

Neste processamento, cabe destaque para as imagens de ótima qualidade obtidas pela integração de dados aerogeofísicos e das imagens Landsat TM, utilizando-se a técnica de conversão entre os espaços de cores HSI e RGB.

A inclusão das bandas texturais no algoritmo de classificação supervisionada implica em um rigor maior, aumentando o número de pixels não classificados e diminuindo drasticamente o índice de pixels mal classificados, reduzindo-se o índice de erros total de 22.1 para 8.5 %.

Não obstante, а ausência de características radiométrico/texturais distintivas de cada um dos fácies mapeados é refletida pelo altos índices de erros obtidos no processo de classificação. Estes índices são menores para as áreas de textura mais bem definidas, como é o caso das áreas urbanas e de bacia sedimentar. O Granito Salto, de textura rapakivi, foi o que apresentou maior variação do índice de erros com a inclusão das texturais, passando de 95.8 para 14.7 % de bandas pixels classificados erroneamente.

Numa avaliação mais geral, pode-se concluir que a imagem estudada possui algumas características desfavoráveis para o processamento digital, tais como a forte ocupação humana, a ausência de extensas áreas de alteração hidrotermal e as dimensões reduzidas das ocorrências minerais. Estes fatores foram decisivos para a pouca eficiência das técnicas de processamento digital empregadas, fortalecendo assim os dados de aerogamaespectrometria.

6.2. Avaliação das técnicas utilizadas

A utilização de um Sistema Geográfico de Informações para a análise de dados geoquímicos e aerogeofísicos, incluindo a geração de imagens e diagramas previsionais derivados, se confirma como uma importante ferramenta de trabalho, permitindo a obtenção de dados dificilmente integrados por outras técnicas tradicionais.

Dentre estas imagens, merecem destaque os diagramas ternário-espaciais dos dados geoquímicos, os quais permitem a visualização espacial da evolução faciológica da Suíte Granítica e a formulação de uma sequência de colocação dos fácies. Esta técnica mostra-se útil para o tratamento de áreas geologicamente homogêneas, como intrusões graníticas, derrames basálticos ou depósitos calcáreos.

O procedimento adotado para a seleção de áreas de maior potencial mineral no interior da área de estudo foi linear e coerente com as informações disponíveis, podendo ser empregado como padrão para trabalhos futuros.

O algoritmo proposto para a caracterização textural de imagens representa um avanço na aplicação dos conceitos

geoestatísticos em sensoriamento remoto, acrescentando facilidades não encontradas nos métodos anteriores. Entre estas facilidades, incluem-se

- a possibilidade de seleção do tipo de variograma a ser aplicado;

 - a seleção do número de bandas originais a partir das quais serão geradas as bandas texturais;

 - a clara ligação entre a estrutura do variograma e a dimensão da janela a ser utilizada no processo de geração das bandas texturais;

- a escolha dos valores de variogramas mais característicos para as texturas consideradas;

- a possibilidade de utilização de qualquer algoritmo de classificação de imagens, uma vez geradas as bandas texturais;

- a pronta integração dos programas propostos com os diversos sistemas de processamento digital de imagens existentes;

Os testes realizados em imagens sintéticas e em texturas bem definidas permitiram sua indicação para a complementação dos algoritmos tradicionais de classificação de imagens digitais. Para a área estudada, a inclusão das bandas texturais não foi suficiente para a caracterização dos fácies graníticos mapeados ou das áreas alvo para a prospecção mineral.

Estes resultados não devem ser encarados como definitivos dentro do desenvolvimento da técnica, havendo ainda uma infinidade de questões a serem resolvidas e de testes a serem realizados. Dentre estes, gostaríamos de destacar:

 - a aplicação da técnica em imagens com menor cobertura vegetal e ocupação antrópica, preferencialmente com depósitos minerais econômicos de maiores proporções;

 o estudo de um índice expedito para a caracterização da banda com maior variabilidade textural;

- o estudo comparativo entre as texturas de um mesmo alvo bem caracterizado em imagens diversas (bandas TM, MSS, radares, fotografias aéreas);

- a determinação da correlação textural entre diferentes bandas Landsat.

O estudo aqui apresentado deve ser encarado como uma modéstia contribuição à discussão das idéias e ao desenvolvimento das técnicas de processamento digital de imagens como um todo. Futuros trabalhos certamente serão realizados, contando-se para tanto com a participação crítica de outros interessados na aplicação dos conceitos geoestatísticos em imagens de sensoriamento remoto, muitos dos quais bem mais capacitados que este autor.

BIBLIOGRAFIA

- ABRAMS, M.J. Landsat-4 Thematic Mapper and Thematic Mapper simulator data for a porphyry copper deposit. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 50, n° 8: 1171-3, Aug. 1984.
- ABRAMS, M.J.; BROWN, D.; LEPLEY, L. & SADOWSKI, R. Remote sensing for porphyry copper deposits in Southern Arizona. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 78, n° 4: 591-604, 1983.
- ALMEIDA FILHO,R. Sensoriamento remoto orbital aplicado à prospecção mineral nas Províncias Estaníferas de Goiás e Rondônia: uma contribuição metodológica. São Paulo: USP/IG, 1983, 171 p. (tese de doutorado)
- ANJOS, I.L.S. & MOURÃO, L.M. Projeto São Paulo Rio de Janeiro, Relatório Final, Processamento de Dados, Parte I - São Paulo. Texto, vol. 2, Cia. de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). 1988, 29 p.
- ANUTA, P.E. Computer-assisted analysis techniques for remote sensing data interpretation. *Geophysics*, Tulsa, Oklahoma: Soc. of Exploration Geophysicists, vol 42, n° 3: 468-81, Apr. 1977.
- ARTUR,A.C. (1980) apud: HASUI,Y. et al. O embasamento pré-cambriano e o eopaleozóico em São Paulo. In: Mapa Geológico do Estado de São Paulo, vol. I, escala 1 : 500.000. São Paulo, IPT, 1981. p 18.
- BOLSTAD, P.V. & LILLESAND, T.M. Rapid maximum likelihood classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 57, n° 1: 67-74, Jan. 1991.
- BRIGGS, I.C. Machine contouring using minimum curvature. Geophysics, Tulsa, Oklahoma: Soc. of Exploration Geophysicists, vol. 39, n° 1: 39-48, 1974.
- CAMPOS NETO,M. da C. & BASEI,M. (1983) apud: GALEMBECK,T.M.B. Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva - Complexo Granitóide Itu (SP). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1991, p.21 (tese de mestrado)
- CAMPOS NETO,M. da C. & CORDANI,U.G. (1985) apud: GALEMBECK,T.M.B. Aspectos Geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva-Complexo Granitóide Itu (SP). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1991, p.21 (tese de mestrado)

- CARR, J.R. & MYERS, D.E. Application of the theory of regionalized variables to the spatial analysis of Landsat data. In: IEEE PECORA 9 SPATIAL INFORMATION TECHNOLOGIES FOR REMOTE SENSING TODAY AND TOMORROW, 1984. Proceedings..., s.n.t., 1984, p.55-61.
- CETIN,H. & LEVANDOWSKI,D.W. Interactive classification and mapping of multi-dimensional remotely sensed data using n-dimensional probability density functions (nPDF). *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRM), vol. 57, n° 12: 1579-87, Dec. 1991.
- CHAVEZ Jr., P.S. & BAUER, B. An automatic optimum kernel-size selection technique for edge enhancement. *Remote Sensing of Environment*, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 12: 23-38, 1982.
- CHAVEZ Jr., P.S. & KWARTENG, A.Y. Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), vol. 55, n° 3: 339-48, Mar. 1989.
- COGO, S.E.V. Feições de textura para classificação de imagens. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. Anais ... Curitiba: INPE/SEMA/SELPER/SBC, 1993, vol. II, p. 339-46.
- CORDANI, U.G. & BITTENCOURT, I. Determinações de idade potássioargônio em rochas do Grupo Açungui. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 21, 1967, Curitiba. Anais... Curitiba: SBG, Nov. 1967, p.218-33.
- CRIPPEN, R.E. The dangers of underestimating the importance of data adjustments in band ratioing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, n° 4: 767-76, 1988.
- CRÓSTA, A.P. Mapping off residual soil by remote sensing for mineral exploration in SW Minas Gerais State, Brazil. London: s.n., 1990. 452 p. (tese de doutorado)
- CRÓSTA, A.P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.
- CURRAN, P.J. What is a semi-variogram ? In: REMOTE SENSING SOCIETY ANNUAL CONFERENCE, 13, 1987, Notthingham. **Proceedings...** Notthingham: Remote Sensing Society, University of Notthingham, 1987, p. 36-45.
 - . The semivariogram in remote sensing: an introduction. *Remote Sensing of Environment*, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 24: 293-507, 1988.
- DRURY,S.A. Image interpretation in Geology. London, Allen & Unwin, 1987. 243 p.

EBERT, H. (1967) **apud**: Léxico Estratigráfico do Brasil. Brasília, CPRM, 1984. p. 20.

- EBERT,H. Os paraibídes entre São João del Rei (MG) e Itapira (SP) e a bifurcação entre os paraibídes e araxaídes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, 1971, São Paulo. Boletim Especial 1, Resumos das Comunicações. São Paulo: SBG/Núcleo São Paulo, 1971, p.177-8.
- FELDMAN, S.C. & TARANIK, J.V. Comparison of techniques for discriminating hydrotermal alteration minerals with airbone imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 24: 67-83, 1988.
- FERREIRA, F.J.F. Aerogamaespectrometria e aeromagnetometria de um trato ocidental do Pré-Cambriano paulista. São Paulo: Instituto de Geociências/USP, 1991, 150 p. (tese de doutoramento)
- FERREIRA, J.C.G. Avaliação e integração de dados Landsat TM, geofísicos e geológicos através de técnicas de processamento digital de imagem e sistema de informações geográficas. São José dos Campos: Secretaria da Ciência e Tecnologia, Instituto de Pesquisas Espaciais/INPE, 1992, 184 p. (dissertação de mestrado)
- FIORI, A.P. (1979) **apud**: Léxico Estratigráfico do Brasil. Brasília, CPRM, 1984. p.21.
- FIORI,A.P. et alii (1978) apud: GALEMBECK,T.M.B. Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva-Complexo Granitóide Itu (SP). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1991, 195 p. (tese de mestrado)
- FRANKLIN, S.E. & PEDDLE, D.R. Texture analysis of digital image using spatial cooccurrence. Computers & Geosciences, Oxford, Pergamon Press, vol. 13, n° 3: 293-311, 1987.
- FRASER,S.J.; GABELL,A.R.; GREEN,A.A. & HUNTINGTON,J.F. Targeting epithermal alteration and gossans in weathered and vegetated terrains using aircraft scanners: succesful australian case histories. Artigo apresentado in: THEMATIC CONFERENCE "REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY", 5, Reno, Nevada, Sep.-Oct. 1986.
- GALEMBECK, T.M.B. Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva - Complexo Granitóide Itu (SP). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1991, 195 p. (tese de mestrado)
- GILLESPIE, A.R.; KAHLE, A.B. & WALKER, R.E. Color enhancement of highly correlated images: I.Decorrelation and HSI contrast stretches. *Remote Sensing of Environment*, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 20: 209-35, 1986.

- GLASS,C.E; CARR,J.R.; YANG,H.-M. & MYERS,D.E. Application of spatial statistics to analyzing multiple remote sensing data sets. In: Geothecnical Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission, Philadelphia, American Society for Testing and Materials, 1988, p. 138-50. (ASTM STP 967)
- GOETZ,A.F.H.; ROCK,B.N. & ROWAN,L.C. Remote sensing for exploration: an overview. Economic Geology, El Paso/Tx, 1978, n° 4: 573-90, jun.-jul. 1983.
- GOETZ, A.F.H. & ROWAN, L.C. Geologic Remote Sensing. Science, Washington: Am. Soc. for the Advancement of Science, vol. 211, n° 4484: 781-91, Feb.1981.
- GUO,L.J. Balance contrast enhancement technique and its application in image colour composition. *International Journal of Remote Sensing*, London, vol. 12, n° 10: 2133-51, Aug. 1991.
- HARALICK,R.M.; SHANMUGAM,K. & DINSTEIN,I. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man, and CyberneTics, vol. SMC-3, n° 6: 610-21, Nov. 1973.
- HARRIS, J.R.; MURRAY, R. & HIROSE, T. IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 56, n° 12: 1631-41, Dec. 1990.
- HASUI,Y.; PENALVA,F. & HENNIES,W.T. Geologia do Grupo São Roque. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 23, 1969, Salvador. Anais... Salvador: SBG, Out. 1969, p. 101-34.
- . O embasamento pré-cambriano e eopaleozóico em São Paulo. In: Mapa Geológico do Estado de São Paulo, vol. I, escala 1 : 500.000. São Paulo, IPT, 1981. p 18.
- HASUI, Y.; PONÇANO, W.L. ; BISTRICHI, C.A.; STEIN, D.P.; GALVÃO, C.A.C. de F.; GIMENEZ, A.F.; ALMEIDA, M.A.; MELO, M.S. & PIRES NETO, A.C. As grandes falhas do leste paulista. In: SIMPÓSIO GEOL. REGIONAL, 1, 1977. Atas... p. 369-80.
- HE,D.-C. & WANG,L. Texture unit, texture spectrum, and texture analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, n° 4, Jul. 1990.
- HEIJMANS, H.J.A.M. & RONSE, C. The algebraic basis of mathematical morphology: I- Dilations and erosions. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, vol. 50: 245-95, 1990.
- HENNIES, W.T.; PENALVA, F. & HASUI, Y. Geologia do Pré-Cambriano a NW da capital paulista. Boletim Paranaense de Geociências, Curitiba, vol. 26:17-8, 1967.

- HIRATA,R.C.A. (coord.) et alii. Subsídios do meio físicogeológico ao planejamento do município de Itu (SP). São Paulo, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo-Instituto Geológico, 1991. 257 p. (Relatório Técnico Interno, vol II).
- HUNT, G.R. Spectral Signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics*, Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, vol. 42, n° 3: 501-513, Apr. 1977.
- HUNT,G.R. & ASHLEY,R.P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 74, n° 7: 1613-29, Nov. 1979.
- JANASI, V.A. & VLACH, S.R.F. O magmatismo granitóide pós-orogênico: tipologia e aspectos genéticos. Boletím do IG-USP, São Paulo, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Publicação Especial, nº 9: 51-4, Nov. 1991.
- KAUFMANN, 8 PFEIFFER, Β. Image optimization Η. versus classification - an application-oriented comparison of different methods by use of thematic mapper data. Photogrammetria, Amsterdam : Journal the of International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Elsevier Science Publishers, vol. 42, n° 5/6: 311-24, May 1988. (ISSN 0031-8663)
- LAMB,A.D. & PENDOCK,N.E. Band prediction techniques for the mapping of hydrotermal alteration. Artigo apresentado in: THEMATIC CONFERENCE ON REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY, 7, Calgary, Alberta, Canada, Oct. 1989.
- LAVREAU, J. & FERNANDEZ-ALONSO, M. Correcting airborne radiometric data for water/vegetation screening using Landsat Thematic Mapper imagery. In: THEMATIC CONFERENCE ON GEOLOGIC REMOTE SENSING, 8, 1991, Denver, Colorado. Proceedings... Denver: 1991, p. 439-46.
- LILLESAND, T.M. & KIEFER, R.W. Remote Sensing and Image Interpretation. New York, John Wiley and Sons, 1979, 2nd Ed., 721 p.
- LOUGHLIN, W.P. Principal component analysis for alteration mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 57, n° 9: 1163-9, Sep. 1991.
- MACDONALD, J.A. & CARR, J.R. Applications of geostatistics to image analysis. In: IGARSS'89 CONFERENCE, 1989, Vancouver, B.C. Proceedings... Vancouver: 1989, p. 2409-2411.
- MACDONALD, J.A.; MIRANDA, F.P. & CARR, J.A. Textural image classification using variograms. Paper presented in: SPIE TECHNICAL SYMPOSIUM ON OPTICAL ENGINEERING AND PHOTONICS IN AEROSPACE SENSING, 1990, Orlando. Orlando, Florida, Apr. 1990, 15 p.

- MAGEE,R.W.; MOORE,J.McM. & BRUNNER,J. Thematic mapper data applied to mapping hydrothermal alteration in South West New Mexico. Artigo apresentado in: THEMATIC CONFERENCE "REMOTE SENSING FOR EXPLORATION GEOLOGY", 5, Reno, Nevada, Sep.-Oct. 1986.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 58, n° 8: 1246-66, Dec. 1963.
- MAUSEL, P.W., KRAMBER, W.J. & LEE, J.K. Optimum Selection for supervised classification of multispectral data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 56, n° 1: 55-60, Jan. 1990.
- MIRANDA, F.P. Reconnaissance geologic mapping of a heavily-forested shield area (Guiana Shield, Northwestern Brazil). Reno, University of Nevada, Nov. 1990, 174 p. (tese de doutorado)
- OFFIELD, T.W.; ABBOTT, E.A.; GILLESPIE, A.R. & LOGUERCIO, S.O. Structure mapping on enhanced Landsat images of Southern Brazil: tectonic control of mineralization and speculations on metallogeny. *Geophysics*, Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, vol. 42, n° 3: 482-500, Apr. 1977.
- PASCHOLATI, E.M. Caracterização geofísica da Suíte Intrusiva de Itu. São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico/USP, 1990, 135 p. (tese de doutorado)
- PASCHOLATI, E.M.; VLACH, S.R.F. & AMARAL, G. Contribuição ao conhecimento da Suíte Intrusiva de Itu. In: SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOLOGIA, 6, 1987, Rio Claro. Atas... Rio Claro: SBG/Núcleo São Paulo, 1987, vol. 1: 47-62.
- PENALVA, F. & WERNICK, E. Feições estruturais de migmatitos ao norte e sul da Falha de Jacutinga, leste do estado de São Paulo. Ciências e Cultura, São Paulo, vol. 25: 183, 1973.
- PHOTO INTERPRETATION. Morphologie Mathématique. Paris, Eska, Editions Technip, n° 1988-5, numéro spécial. (ISSN 0031-8523)
- PITCHER,W.S. Granite type and tectonic environment. In: HSU,K.I. Mountain building processes. London, Academic Press, 1982. p. 19-40.
- PODWYSOCKI, M.H.; SEGAL, D.B. & ABRAMS, M.J. Use of multispectral scanner images for assessment of hydrothermal alteration in the Marysvale, Utah, mining area. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 78, n° 4: 675-87, Jun.-Jul. 1983.
- PROST,G. Alteration mapping with airborne multispectral scanners. Economic Geology, El Paso/Tx, vol. 75, nº 6: 894-906, Sep./Oct. 1980.

- RIBEIRO, E.S.C.; LEITE, P. & FERRAZ, J.F. Geração de imagens raster de dados geofísicos pelo método de mínimas curvaturas. Artigo submetido ao 3º CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA. Rio de Janeiro, 1993.
- ROLIM, S.B.A.; PARADELLA, W.R.; VASCONCELOS, R.M. & AZEVEDO, M.L.V. Metodologia para a geração de imagens de geofísica: uma contribuição à integração de dados na pesquisa geológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7, 1993, Curitiba. Anais ... Curitiba:INPE/SEMA/SELPER/SBC, 1993, vol.III, p. 315-9.
- ROTHERY,D. Decorrelation stretching and related techniques as an aid to image interpretation in Geology. Artigo apresentado no ANNUAL CONFERENCE OF THE REMOTE SENSING SOCIETY, 13, Nottingham. University of Nottingham, sep. 1987.
- ROWAN, L.C.; GOETZ, A.F.H. & ASHLEY, R.P. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*, Tulsa, Oklahoma: Society of Exploration Geophysicists, vol. 42, n° 3: 522-35, Apr. 1977.
- ROWAN, L.C. & KAHLE, A.B. Evaluation of 0.46 to 2.36 µm Multispectral scanner images of the East Tintic Mining District, Utah, for mapping hidrothermally altered rocks. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 77: 441-52, 1992.
- RUBIN,T. Analysis of radar texture with variograms and other simplified descriptors. In: IMAGE PROCESSING'89 CONFERENCE, 1989, Sparks, Nevada. Proceedings... Sparks: American Society for Photogrametry and Remote Sensing, 1989, p.185-195.
- SALDANHA, R. O estudo da jazida de wolframita de Inhandjara. Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, São Paulo, Universidade de São Paulo, vol. 51, n° 8, 1946, 97 p.
- SEGAL, D.B. Use of Landsat Multispectral Scanner data for the definition of limonitic exposures in heavily vegetaded areas. *Economic Geology*, El Paso/Tx, vol. 78, nº 4: 711-22, Jun.-Jul. 1983.
- SERRA, J. Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, 1982. 610p.
- SHEFFIELD, C. Selecting band combinations from multispectral data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 51, n° 6: 681-7, Jun. 1985.
- TASSINARI,C.C.G., TAYLOR,P.M. & KAWASHITA,K. (1987) apud: PASCHOLATI,E.M. Caracterização geofísica da Suíte Intrusiva de Itu.São Paulo: Instituto Astronômico e Geofísico/USP, 1990, 135 p. (tese de doutorado)

- VENEZIANI, P. & ANJOS, C.E. Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em Geologia. São José dos Campos: INPE, 1982. 51 p. (Publicação nº INPE-2227-MD/014)
- WANG,L. & HE,D.C. A new statistical approach for texture analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Falls Church, Virginia, vol. 56, n° 1: 61-6, Jan. 1990.
- WERNICK,E. (1967) apud: GALEMBECK,T.M.B. Aspectos geológicos, petrográficos e geoquímicos da Intrusão Cabreúva - Complexo Granitóide Itu (SP). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP, 1991, 195 p. (tese de mestrado)
- WERNICK, E. & PENALVA, F. Depósitos molássicos da Formação Eleutério, São Paulo-Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, 1974, Porto Alegre. Boletim 1, Resumos das Comunicações. Porto Alegre: SBG, 1974, p. 723-26.
- WERNICK, E. et alii. Estudo geocronológico pelo método Rb/Sr em rochas do Bloco Jundiaí e regiões adjacentes. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, SBG, vol. 6: 125-35, 1976.
- WOODCOCK,C.E; STRAHLER,A.H. & JUPP,D.L.B. The use of variograms in remote sensing: I. scene models and simulated images. Remote Sensing of Environment, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 25: 323-48, 1988(a).

. The use of variograms in remote sensing: II. real digital images. *Remote Sensing of Environment*, New York, Elsevier Science Publishing, vol. 25: 349-79, 1988(b).

ANEXO I : SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO À GEOLOGIA

A.1.CONCEITOS INICIAIS

O princípio básico empregado nas imagens de satélite Landsat (excetuando-se a banda termal) é o de que os diversos objetos na superfície do planeta, ao receberem energia emitida pelo Sol e filtrada pela atmosfera, absorvem parte desta energia e refletem outra parte, em comprimentos de onda que são diretamente relacionadas à sua composição química e estrutura cristalina, entre outras propriedades.

Cabe ao sistema sensor captar a energia refletida segundo vários comprimentos de onda, codificá-la e transmitir as informações sob a forma de sinais a estações terrestres , onde serão convertidos em imagens.

A interpretação destas imagens deve sempre ser feita tendo-se em mente suas características básicas no que concerne aos processos de coleta e registro dos dados e de seu real significado e correlação com a verdade imageada.

A utilização das imagens de satélite em mapeamentos de grande escala foi uma das primeiras aplicações diretas em Geologia, como decorrência da cultura adquirida anteriormente através da análise de fotografias aéreas. Desta forma, as técnicas visuais de fotointerpretação puderam ser prontamente adaptadas à nova escala e foram rapidamente difundidas. Os princípios básicos utilizados estão claramente expostos por Goetz & Rowan (1981), Veneziani & Anjos (1982), Goetz *et al.* (1983), Drury (1987) e Lillesand & Kiefer (1987), e não serão aqui detalhados.

Uma vez que os sinais captados e convertidos em imagens são resultantes da interação da radiação eletromagnética incidente e o conjunto natural rocha-solo-vegetação-água atingido, a correlação entre estes valores e os alvos imageados passou a ser importante ferramenta para a identificação de minerais e rochas nos levantamentos geológicos básicos, entre outras aplicações.

A identificação em laboratório e no campo do do comportamento espectral de minerais e rochas permitiu a sua

A1

catalogação e os trabalhos acumulados fornecem-nos atualmente amplo acervo experimental. Importantes trabalhos neste sentido são os apresentados por Hunt & Salisbury (1970), Hunt *et al.* (1971), Hunt (1977), Hunt & Ashley (1979), Goetz & Rowan (1981) e Goetz *et al.* (1983).

A Tabela A.1 reúne alguns aspectos principais levantados nestes trabalhos, associando-os às bandas TM correspondentes às feições características de reflectância e absorção utilizados via de regra para a análise de imagens.

	Reflectância	Absorção	Banda TM
Límonita	1.3 (0.7)	0.45 a 0.50 0.85 a 0.92	- (3), 1 - (3), 4
Alteração Hidrotermal (Grupos OH - argilas, carbonatos e micas)	1.6	2.1 a 2.4	5, 7
Vegetação verde	0.8 a 1.0	0.5 a 0.7	4, 2-3

Tabela A.1 : Principais feições diagnósticas e bandas TM associadas

A íntima relação entre importantes jazidas minerais e processos de alteração hidrotermal levou à inclusão da banda 7 no Sistema Landsat, e os trabalhos para identificação destes fenômenos via imagem tornaram-se intensivos.

Exemplos de trabalhos mais específicos para a identificação de minerais e áreas de alteração hidrotermal são os de Rowan *et al.* (1977), Hunt & Ashley (1979), Prost (1980), Podwysocki *et al.* (1983), Almeida Filho (1983), Abrams (1984), Fraser *et al.* (1986), Magee *et al.* (1986), Lamb & Pendock (1989), Feldman & Taranik (1988), Loughlin (1991) e Rowan & Kahle (1992).

A.2. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DAS IMAGENS LANDSAT TM

O programa de pesquisas espaciais da NASA lançou ao espaço em 1982 o satélite denominado Landsat 4, acrescentando ao até então utilizado sistema sensor MSS (*Multi Spectral Scanner*) o

sistema TM (Thematic Mapper). Entre outras inovações técnicas, o novo sistema apresentou melhorias nas resoluções espectral (sete bandas, contra cinco do MSS), radiométrica (256 tons de cinza, contra 64 do MSS) e espacial (pixel de 30 metros para as bandas 1 a 5 e 7, contra 79 do MSS).

Em termos simplistas, uma imagem pode ser considerada uma matriz de **m** linhas e **n** colunas, onde cada célula é denominada **pixel** (picture element). Cada pixel corresponde, grosso modo, à energia refletida média por uma área equivalente ao pixel, em uma determinada faixa do espectro (banda).

A Figura A.1 mostra o a curva espectral de absorção da atmosfera, destacando-se as regiões do espectro segundo o comprimento de onda. Na Figura A.2 uma curva de comportamento típico da vegetação é plotada com as bandas dos sistemas Landsat MSS e TM.



Figura A.1 : Espectro de absorção da atmosfera no zênite com regiões espectrais. Extraído de Goetz & Rowan (1981).



Figura A.2 : Curva de reflectância típica de vegetação verde adquirida no campo. as bandas Landsat TM e MSS estão indicadas. Extraído de Goetz et al. (1983).

A Tabela A.2 resume as características básicas das bandas do sistema Landsat TM, com suas aplicações principais segundo o projetado pela NASA.

A intensidade da energia refletida em cada banda é convertida pelo sistema em um valor na escala de 0 a 255 (DN -*Digital Number*), correspondentes respectivamente ao preto e ao branco nas imagens produzidas.

Os sinais codificados são armazenados em fitas compatíveis com computadores, estando a partir daí disponíveis para a utilização em sistemas diversos de processamento digital de imagens.

A4
Banda	Range	Principais Aplicações
TM 1	0.45 - 0.52 µm	Designado para penetração em água, tornando-se útil para mapeamento de áreas costeiras. Também útil para a diferenciação de solo de vegetação e flora conífera de decídua.
TM 2	0.52 - 0.60 µm	Designado para medir o pico de reflectância verde da vegetação para estimação de vigor.
ТМ З	0.63 - 0.69 µm	Uma banda de absorção da clorofila importante para discriminação vegetal.
TM 4	0.76 - 0.90 µm	Útil para determinação do conteúdo de biomassa e para delineamento de corpos aquosos.
TM 5	1.55 - 1.75 μm	Indicativo do conteúdo de umidade de vegetação e umidade do solo. Também útil para diferenciação de neve de nuvens.
TM 6	10.40-12.50 µm	Uma banda infra-vermelho termal de uso na análise de stress vegetal, discriminação da umidade do solo e mapeamento termal.
TM 7	2.08 - 2.35	Uma banda selecionada pelo seu potencial para discriminação de tipos de rochas e para mapeamento hidrotermal.

Tabela A.2 : Bandas TM: range espectral e principais aplicações. Fonte: NASA, folheto de divulgação.

A.3. PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGENS DE SATÉLITE

Os sistemas de processamento de imagens via de regra utilizados baseiam-se em funções matemáticas mais ou menos simples visando a caracterização dos alvos estudados, sejam eles de caráter geológico, biológico, antropomórfico, etc. A principal ressalva a ser feita à maioria destes métodos é a de que não são capazes de adequada análise е consideração dos dados texturais uma disponíveis, uma vez que são fundados basicamente nos valores de DN (níveis de cinza) de cada pixel e em seu contraste, não sendo suficientemente sensíveis à distribuição espacial destes valores.

A seguir serão apresentadas sucintamente as características de cada uma das operações mais citadas, juntamente com exemplos de aplicações encontrados na literatura. Para um estudo mais detalhado destas funções recomendam-se os trabalhos de Anuta (1977), Veneziani & Anjos (1982), Drury (1987) e Crósta (1992).

A.3.1.Aumento de Contraste

Esta operação é a mais simples no processamento digital de imagens.

A calibração do sistema sensor é feita de forma que possam ser atribuídos valores variando entre 0 e 255 para todos os alvos que possam vir a ser imageados na superfície da Terra. Como dificilmente teremos uma variação tão grande de alvos em uma única cena, o resultado final é que em cada cena individual apenas uma faixa do *range* total possível ocorre.

O aumento de contraste consiste assim de um operação de transformação de escalas, a partir dos valores originais, atingindo-se como resultado final toda a gama possível de valores de cinza.

As funções de aumento de contraste lineares têm como vantagem principal a manutenção da estrutura e textura dos dados, já que a relação entre eles não é modificada. Outras funções são também possíveis dependendo do objetivo pretendido, conforme bem discutido por Guo (1991).

Raramente o aumento de contraste é utilizado como técnica única de processamento digital, sendo mais comumente utilizado como primeiro passo no algoritmo de processamento. Offield *et al.* (1977) utilizaram aumentos de contraste como principal ferramenta para o estudo tectono-estrutural de imagens Landsat MSS na área do Escudo Riograndense, aliados a uma filtragem Gaussiana.

A.3.2. Filtragens Espaciais

As filtragens espaciais são operações aritméticas executadas na imagem através de janelas móveis ou "máscaras" (kernels) que procuram realçar feições de "baixa" ou "alta" frequências (domínios homogêneos e bordas ou estruturas, respectivamente) e/ou eliminar "ruídos" causados pelos sistemas sensores.

De acordo com o objetivo específico, os filtros são construídos em formas (quadrado, retângulo, cruz) e tamanhos distintos. Os valores internos ao filtro são utilizados como pesos nas operações aritméticas realizadas com os pixels da imagem original, gerando uma imagem produto que nem sempre preserva a estrutura e textura originais.

Um grave problema encontrado nos filtros direcionais, que visam o realce de estruturas em determinadas direções, é a criação de artefatos. Estes filtros devem, portanto, ser utilizados com cautela.

Outro problema comum é a escolha das dimensões ótimas do filtro. Chavez Jr. & Bauer (1982) propuseram um método prático para a determinação automática das dimensões de um filtro quadrado para realce de bordas baseado na utilização da primeira diferença da imagem, calculada em uma determinada direção:

> DIF (I) = PT(I+1) - PT(I) + N/2, onde DIF (I) é a primeira diferença PT(I+1) é o valor do pixel vizinho PT(I) é o valor do pixel

N é o número de valores de DN possíveis (256)

A análise estatística destes valores calculados na imagem inteira fornece um índice **delta** (aproximadamente igual a 2,3 vezes o desvio padrão de DIF(I)), que é correlacionado à rugosidade da imagem. O tamanho do filtro ideal é definido em função desta rugosidade, a partir da seguinte relação:

kernel = 12 - delta

Existem na literatura filtros de uso consagrado, como os de média, mediana, moda e os direcionais, e sua utilização deve ser feita de acordo com a cena considerada.

A morfologia matemática não pode ser considerada como simples processo de filtragem espacial, conforme destacam Heijmans & Ronse (1990), porém em comum com este processo tem o conceito de elemento estruturante móvel que varre toda a imagem, modificando-a. Este elemento estruturante é via de regra uma entidade geométrica simples, de dimensões bem definidas, porém nem sempre simétricas ou isótropas.

A teoria da morfologia matemática tem suas raízes em comum com a Geoestatística, sendo inclusive o variograma uma ferramenta presente em ambas. A derivação das aplicações práticas levou-as, temporariamente, a percorrer caminhos paralelos que se entrecruzam na análise de imagens de sensoriamento remoto. A morfologia matemática possui maior expressão junto à escola francesa, destacando-se os trabalhos de Serra (1982) e o número especial da revista Photo Interprétation de setembro/outubro 1988, reunindo artigos diversos da aplicação desta técnica na análise de lineamentos em imagens MSS e SPOT.

A.3.3. Composições Coloridas

O espaço de cores RGB (Figura A.3) é o mais amplamente utilizado nos sistemas de processamento digital de imagens, embora outros possam ser encontrados na literatura.



Figura A.3 : Espaço de cores RGB. O eixo A é o eixo acromático, de níveis d cinza. Extraído de Harris *et al.* (1990).

A técnica é conceitualmente bastante simples, e consiste em utilizar os valores de DN de três bandas de uma mesma imagem como pesos numa combinação linear das cores vermelho, verde e azul. Sendo estas cores primárias, uma infinidade de cores derivadas pode ser gerada através desta combinação e estas cores auxiliam na interpretação da imagem. A escolha das bandas a serem combinadas (triplete) é função do alvo considerado e da área imageada (características topográficas, clima, vegetação, ocupação, etc.).

Os tripletes mais comumente citados são os TM 3,2,1 (cor real) e TM 4,3,2 ("falsa cor"), mais por razões históricas que por boa diferenciação de alvos.

Sheffield (1985), baseado na sensibilidade diferenciada do olho humano em relação às cores, sugere a otimização da combinação colorida através da atribuição da cor verde para a banda de maior variância (e teoricamente com maior informação textural), vermelho para a intermediária e azul para a de menor variância.

Rothery (1987) apresenta como prática comum entre os autores que trabalharam em áreas de clima árido a semi-árido para a discriminação litológica o uso da banda TM 7 aliada a duas outras escolhidas entre as bandas 5,4 e 2, num sistema RGB. Em seu trabalho, o autor utilizou um triplete TM 7,5,4 para a subdivisão litológica dos ofiolitos de Oman.

Sheffield (1985) propôs um método para seleção das melhores combinações coloridas de bandas TM, baseado na matriz de variância-covariância entre estas bandas. O autor demonstrou que as melhores bandas não são aquelas que apresentam as maiores variâncias individuais, e muito menos as tradicionais "cor real" e "falsa cor".

A combinação colorida de tripletes tornou-se uma técnica tradicional dentro do processamento digital de imagens, sendo utilizadas nas combinações não apenas bandas originais, mas também operações entre bandas (predominando as razões de bandas), componentes principais, imagens filtradas, etc.

A.3.4. Razões de Bandas

Dentre as operações aritméticas entre bandas, a razão é a mais utilizada pelo seu grande potencial para maximizar contrastes de comportamento espectral de um mesmo alvo nos diferentes comprimentos de onda.

Α9

O processo já historicamente consagrado consiste em definir as razões mais interessantes de acordo com o alvo a ser realçado e combiná-las em composições coloridas que facilitem ao observador a análise visual posterior.

Não obstante seu uso generalizado, algumas observações feitas pelos diversos autores a respeito de problemas inerentes às razões de bandas devem ser aqui relembradas:

- o fenômeno de dispersão atmosférica não afeta igualmente todas as bandas, podendo gerar distorções nos produtos obtidos pelas razões em caso de não correção prévia. Crippen (1988) dá especial atenção aos possíveis problemas daí decorrentes;

- as razões de bandas eliminam toda informação de caráter topográfico, uma vez que estas informações são comuns a todas as bandas;

 objetos inicialmente distintos em cada banda podem se tornar indistintos em uma razão, caso possuam mesmo comportamento espectral com intensidades diferentes;

Crippen (1988) exemplifica em uma cena de imagem Landsat TM na Califórnia a necessidade de ajustes anteriores à razão de bandas para o correto realce das feições procuradas. O método sugerido é a simples subtração de uma constante distinta de cada banda, que pode ser determinada de maneiras diversas. O mais comum é a subtração do pixel escuro.

A Tabela A.3 indica as principais razões propostas pela literatura para a identificação dos alvos, a partir da análise do comportamento espectral dos materiais e de experimentos práticos.

Rowan et al. (1977) utilizaram uma composição colorida das razões MSS 4/5 (azul), 5/6 (amarelo) e 6/7 (magenta) para a identificação de áreas com alteração hidrotermal (enriquecimento em goethita, hematita, jarosita, alunita, montmorillonita, pirofilita, quartzo e kaolinita) em uma área semi-árida. As áreas de alteração aparecem em tons de verde e marrom, e o índice de acerto foi de 80 %.

Alvo	Razão TM	Referências Bibliográficas
Vegetação Verde	4/3	Fraser et alii (1986), Lamb & Pendock (1989)
Óxidos de Ferro	3/1	Crósta (1992), Magee et alii (1986), Rowan & Kahle (1992)
	3/2	Magee et alii (1986)
	5/1	Magee et alii (1986), Rowan & Kahle (1992), Podwysocki et alii (1983)
	5/4	Magee et alii (1986), Abrams (1984)
Alteração Hidrotermal	5/7	Crósta (1992), Fraser et al. (1986), Magee et alii (1986), Prost (1980), Lamb & Pendock (1989), Rowan & Kahle (1992), Podwysocki et alii (1983), Abrams (1984)

Tabela A.3: Razões de bandas TM e suas aplicações.

Prost (1980) utilizou a mesma técnica aplicada a um sensor multiespectral de 24 canais, obtendo resultados bastante satisfatórios. O autor ressaltou que rochas de natureza diferente, mas com composição mineralógico-química semelhante, poderão ter as mesmas propriedades espectrais, sendo então diferenciáveis pelas informações de contexto e textura.

Segal (1983) utiliza uma razão composta das bandas MSS para a definição de limonita em áreas densamente vegetadas. Através de um estudo direcionado dos espectros da cobertura vegetal, das rochas limonitizadas e das rochas não limonitizadas, Segal (*op. cit.*) concluiu que uma composição colorida formada pelas razões de bandas MSS 4/5, (4/5)/(6/7) e 6/7 é a melhor combinação possível para a área estudada, permitindo o reconhecimento de coberturas limoníticas mesmo em áreas de relevo acidentado e densa cobertura vegetal.

A.3.5. Componentes Principais

As bandas de sensores multiespectrais possuem em geral alta correlação entre si, razão pela qual as operações de aumento de contraste e razão de bandas não são capazes de gerar grande diversidade de cores nas composições coloridas.

A análise de principais componentes consiste em uma operação linear no espaço amostral através de rotação dos eixos originais e sua substituição por novos eixos (componentes principais) decorrelacionados. A operação é conceitualmente simples, como indica a Figura A.4, porém exige uma grande quantidade de cálculos que a tornam bastante mais demorada que as funções anteriormente vistas. Este custo maior de tempo é, no entanto, bem reduzido nas estações de trabalho em sistema UNIX.

A operação pode ser entendida em três etapas, como colocadas por Anuta (1977) e Crósta (1992):

- cálculo da matriz de covariância entre as bandas originais;

- cálculo dos auto-valores e auto-vetores a partir da matriz de covariância. Os auto-valores representam a variância do espaço amostral ao longo dos novos eixos; os auto-vetores definem as direções destes novos eixos;

- cálculo das novas imagens, utilizando-se os autovalores como pesos para as bandas originais.



Figura A.4: Operação de transformação para componentes principais. Os eixos ortogonais são rotacionados em relação ao ponto médio da nuvem de pontos. Extraído de Drury (1987).

A primeira componente principal possui maior variância (e portanto maior quantidade de informação espectral), e assim sucessivamente até as de maior ordem. Caracteristicamente, as três primeiras componentes de uma imagem Landsat TM com 6 bandas no espectro refletido perfazem mais de 95 % da informação espectral total.

Abrams (1984) comparou os métodos de razão de bandas e decorrelação por principais componentes para a determinação de alteração hidrotermal em uma área semi-árida, com resultados muito bons em ambos os casos.

Fraser *et al.* (1986) utilizam as componentes principais das razões TM 5/7 e 4/3 para separar a informação relativa à vegetação (na primeira componente) daquela referente à alteração hidrotermal (segunda componente).

Esta técnica a partir de principais componentes é referida por Chavez Jr. & Kwarteng (1989) como "análise seletiva de componentes principais". Segundo os autores, a técnica é bastante útil tanto na diminuição da dimensionalidade dos dados (utilizando a primeira componente principal no lugar de várias bandas com alta correlação) quanto no isolamento de uma feição espectral específica (utilizando a segunda componente principal de duas bandas com correlação baixa a média).

Lamb & Pendock (1989) citam como técnica eficiente para uma alternativa à razão de bandas a utilização das "componentes principais diretas". Como exemplo, a informação relativa à alteração hidrotermal pode ser isolada na segunda componente principal entre as segundas componentes principais calculadas para os pares de bandas TM 5,7 e 4,3:

PC2(PC2(5,7),PC2(4,3))

Crósta (1990) discute o método de "Feature-oriented PC Selection" (FPCS), que combina as informações extraídas dos comportamentos espectrais dos diversos alvos com a análise dos auto-vetores como contribuição das diferentes bandas às componentes principais. As componentes principais de maior ordem, embora com menor variância (e portanto menor informação espectral total) podem

por vezes concentrar toda a informação diretamente ligada aos alvos, e sua utilização em composições coloridas torna-se assim bastante mais efetiva.

Como exemplo de aplicação da técnica, Crósta (1990) apresenta a delimitação de óxidos de ferro (limonita) na área do Greenstone Belt de Morro do Ferro (SW de Minas Gerais) através da combinação colorida das PCs 4,5 e 6.

Loughlin (1991) apresenta a utilização do método de FPCS através da combinação de componentes principais de quatro bandas TM, selecionadas em função do alvo a ser realçado. Desta forma, para o realce de alteração hidrotermal foram utilizadas as bandas TM 1, 4, 5 e 7. Para óxidos de ferro, as bandas selecionadas foram 1, 3, 4 e 5. Em ambos os casos a informação específica do alvo concentra-se na quarta componente principal, o que é variável de caso a caso estudado.

A.3.6. Decorrelação HSI e aumento de contraste

A decorrelação por componentes principais dentro do espaço de cores RGB gera cores não diretamente interpretáveis a partir dos espectros de reflectância dos alvos estudados, sendo esta considerada sua maior restrição.

Gillespie *et al*. (1986) argumentam que a decorrelação em componentes principais seguida de um aumento de contraste (usualmente linear, mas não necessariamente) e de uma retransformação para os eixos originais é capaz de gerar cores mais diretamente interpretáveis. Esta técnica tem ainda a vantagem de poder ser aplicada a imagens com qualquer número de bandas, porém o resultado é sempre função da cena imageada. Esta técnica foi utilizada anteriormente com sucesso por Abrams (1984).

Uma alternativa utilizada por Gillespie *et al*. (1986) é a decorrelação pelo espaço HSI (Tom,Saturação,Intensidade) através de três etapas consecutivas:

- transformação do espaço RGB para o HSI (Figura A.5);

- aumento de contraste das novas imagens;

- transformação do espaço HSI para o RGB.



Figura A.5: Relação entre os espaços de cores RGB e HSI. Extraído de Drury
(1987).

A imagem resultante possui toda a informação da imagem inicial, porém com uma diversidade de cores bem maior e diretamente interpretáveis a partir dos espectros de reflectância. A maior vantagem em relação às componentes principais é que os resultados não dependem da cena considerada, porém a maior desvantagem é a de que esta técnica só é aplicável a imagens de três bandas.

Este método foi utilizado por Rothery (1987) para a subdivisão litológica do ofiolito de Oman, através da combinação colorida das bandas TM 7,5,4 decorrelacionadas. Este autor considera ainda que outro sistema diferente do HSI, como o N.T.S.C. Y-I-Q poderia ser utilizado, uma vez que o retorno ao sistema RGB no final da operação torna os resultados finais muito próximos.

Uma interessante utilização da conversão RGB para HSI foi proposta por Magee *et al.* (1986). Um triplete TM 4,3,2 ("falsa cor", com correção atmosférica) foi convertida do sistema RGB para o HSI, sucedendo-se um aumento de contraste linear para o *range* entre 0 e 255. A análise "visual" ("level" ou "density slicing") demonstrou que os pixels vegetados possuíam valores entre 130 e 160. Foi então gerada uma máscara atribuindo-se o valor 0 para os pixels vegetados e 1 para os não vegetados. Esta máscara foi utilizada para eliminar a influência da vegetação, através de uma multiplicação pela imagem original.

A técnica de uma "máscara" auxiliar para discriminação da área com cobertura vegetal foi também empregada por Podwysocki *et al.* (1983), porém neste caso a "máscara" foi obtida a partir da razão de bandas.

Outra aplicação comum da conversão para o sistema HSI é a combinação de dados de natureza diferente numa mesma cena, através da substituição de uma das componentes por uma imagem SPOT, geofísica, radar etc.

Harris et al. (1990) demonstraram a versatilidade desta técnica para diferentes combinações de imagens Landsat TM, Radar, aero-geofísica e mapas temáticos. Na combinação entre as imagens TM foram utilizadas duas combinações de bandas originais: 2,4,7 e 2,5,7. Em ambos os casos a componente I do sistema IHS foi substituída pela imagem de radar, e a componente S por uma imagem cinza de DN 150. A reconversão ao sistema RGB gerou imagens otimizadas do ponto de vista estrutural e espectral.

A.3.7. Análise de Lineamentos

Não obstante a importância dos elementos lineares na interpretação de imagens seja unanimamente destacada, não se conta com nenhum sistema consagrado para análise automática de lineamentos, sendo esta etapa tradicionalmente feita pela análise visual, ainda que por vezes com o auxílio de funções para como os filtros direcionais e a morfologia matemática.

Considerando-se a alta sensibilidade do olho humano para a percepção de linhas e bordas (feições de alta freqüência), esta aparente deficiência na automatização do processo se deve à complexidade de um possível *software* que fizesse uma análise dos lineamentos eficiente a partir da imagem bruta, com diferenciação dos lineamentos naturais daqueles resultantes da ocupação humana, como estradas, contornos de cidades, fazendas, cercas, etc.

Offield *et al.* (1977) testaram três funções para o realce de lineamentos em imagem Landsat MSS na área do escudo do Rio Grande do Sul: aumento de contraste, razões de bandas e filtragens. A conclusão dos autores é de que, no caso estudado, o aumento de contraste foi o de melhores resultados. Outra observação importante é a de que os lineamentos interpretados são diferentes banda a banda, devendo ser utilizada uma combinação destes para a interpretação final. O caráter de subjetividade dificilmente pode ser evitado, tendo-se tentado amenizá-lo através da utilização apenas dos lineamentos com extensão superior a 4 Km.

Como resultado deste trabalho, Offield *et al.* (1977) interpretaram um grande lineamento EW possivelmente associado às mineralizações de Cu, Au e Sn do Rio Grande do Sul, com continuidade para o continente africano. Este lineamento só foi realçado pelas bandas do infra-vermelho (MSS 6 e 7).

Abrams *et al.* (1983) utilizaram uma banda TM da faixa do infra-vermelho para análise de lineamentos. Para eliminar a subjetividade, a análise foi feita através de uma malha de 10 x 10 Km, gerando mapas de contorno estrutural.

Drury (1987) e Rothery (1987) recomendam o uso de imagens em preto e branco para a análise visual de lineamentos, preferencialmente utilizando a banda com menor ruído ou a primeira componente principal.

A.3.8. Outras Técnicas

Inúmeras técnicas alternativas para o processamento digital de imagens são propostas na literatura, porém sua aplicação direta em imagens TM nem sempre é possível, quer pela ausência de resolução espectral (bandas muito largas), quer pela inexistência de *softwares* disponíveis.

Fraser et al. (1986) propuseram a utilização de imagens "log-residuais" e de "resíduos mínimos quadrados" para a individualização das informações relativas à alteração hidrotermal e a óxidos de ferro nas bandas TM em áreas da Austrália, com clima semi-árido.

Lamb & Pendock (1989) compararam a eficiência de três técnicas que empregam a informação espectral de todas as bandas disponíveis, em contraste com as de razão de bandas e componentes principais diretas, que se utilizam de apenas duas bandas por operação. Estas três novas técnicas são denominadas "regressão linear múltipla", "regressão polinomial" e "filtro *data adaptive*", e possuem como princípio comum a estimação dos valores de uma banda a partir da combinação das outras. Os resultados obtidos para uma área semi-árida foram considerados superiores aos obtidos pelas técnicas mais tradicionais.

Feldman & Taranik (1988) compararam as técnicas de razão de bandas, componentes principais e de algoritmo de reconhecimento espectral para uma área de alteração hidrotermal com mineralização de ouro. A técnica de algoritmo de reconhecimento espectral baseiase na comparação com um espectro de referência que pode ser retirado da literatura, de resultados preliminares ou da própria imagem tratada. Para Feldman & Taranick (1988), este último método possui, entre outras vantagens, a capacidade de identificar os alvos minerais, e não apenas de diferenciá-los na imagem, exigindo porém algum conhecimento prévio da área estudada para a correta seleção dos espectros de referência.

A.3.9. Classificação

O processo de classificação de imagens consiste no reconhecimento e delimitação de áreas homogêneas em relação a aspectos espectrais e/ou texturais extraídos por critérios e operações diversos, resultando num produto final que pode ser entendido como um mapa temático.

Uma importante característica destes mapas temáticos produtos de classificação de imagens é a perda inerente de informações espectrais e/ou texturais que precisam ser desconsideradas em função do reconhecimento de homogeneidade.

Kaufmann & Pfeiffer (1988) discutem a utilização de imagens classificadas versus imagens "otimizadas" (submetidas às técnicas de realce de contrastes e cores), concluindo que a maior vantagem das últimas seria a transferência da subjetividade da

interpretação ao usuário final. Sugerem o emprego das imagens otimizadas onde a informação textural seja importante, o que seria o caso da Geologia.

Em trabalhos de cunho regional, os mapas gerados por classificação podem ser considerados um mapa geológico inicial. De forma geral, procura-se no processo de classificação o destaque de áreas anômalas em conteúdos de óxidos de ferro e/ou minerais ricos em hidroxila, possivelmente indicativos de concentrações minerais economicamente interessantes.

Os algoritmos de classificação de imagens podem ser subdivididos em dois grandes grupos: espectrais e texturais. Os espectrais, por sua vez, incluem essencialmente dois tipos de algoritmos, conhecidos como "classificação supervisionada" e "classificação não supervisionada".

A.3.9.1. Classificação Não Supervisionada

Em algoritmos deste tipo o usuário não interfere na definição espacial das classes, podendo apenas fornecer alguns dados estatísticos iniciais: número de classes desejadas, distância mínima de separação no espaço amostral para individualização de classes, número mínimo de pontos no espaço amostral para definição de uma classe, etc.

A maior vantagem é a velocidade de computação, porém as classes geradas freqüentemente não são prontamente identificáveis como alvos distintos. Um uso prático é o emprego da classificação não supervisionada para definir as grandes regiões espectrais da imagem, partindo-se então para uma classificação supervisionada.

A.3.9.2. Classificação Supervisionada

A classificação supervisionada tem por vantagem principal a escolha de áreas de treinamento que definem os alvos a serem diferenciados na imagem. O usuário tem, portanto, controle sobre a natureza geológica dos alvos. Como revés, o processo é em seu total bastante mais demorado e complexo que a classificação não supervisionada.

Os métodos mais conhecidos são os do paralelepípedo, o de mínima distância para a média e o de máxima verossimilhança.

O método do paralelepípedo é o mais simples e rápido, consistindo na determinação do "range" de DN coberto pelo alvo em cada banda, definindo um paralelepípedo no espaço amostral multidimensional (Figuras A.6b e A.6c).

O método de mínima distância para a média calcula as médias de cada uma das classes no espaço amostral. Cada pixel é então classificado de acordo com a menor distância linear no espaço amostral multidimensional em relação às médias calculadas (Figura A.6d).

O método de máxima verossimilhança é o mais complexo e demorado, baseando-se em cálculos probabilísticos (Figura A.6e). Para Bolstad & Lillesand (1991), as principais razões para a popularidade do método de máxima verossimilhança incluem a presença de um fundamento teórico bem desenvolvido, a pronta aceitação intuitiva da regra de decisão utilizada e a boa performance em praticamente todos os tipos de cobertura e sensores testados.

Sendo o tempo empregado em cálculos um importante fator limitante para a classificação supervisionada, uma alternativa para contornar o problema seria a seleção de apenas algumas das bandas originais para a caracterização das classes.

Mausel *et al.* (1990) testaram diversos procedimentos matemáticos para a definição de quatro bandas que compusessem uma combinação ideal (aliando bons resultados em termos de precisão e tempo de computação), dentre eles a análise dos auto-vetores. Os autores comprovaram que a seleção das quatro bandas com maiores valores (positivos e negativos) de auto-vetores referentes às quatro primeiras componentes principais (estas calculadas a partir de todas as bandas originais) leva a uma combinação muito próxima da ideal (89.9 % de precisão, contra 92.2 % da combinação ideal).

A observação dos dados apresentados por estes autores, no entanto, mostra que se forem consideradas todas as componentes principais para a análise dos auto-vetores, e não apenas as quatro primeiras, a combinação ideal de 92.2 % de precisão será a indicada.



Figura A.6: Principais métodos de classificação de imagens, com base no espaço multidimensional formado por eixos ortogonais referentes às bandas do sistema sensor. Em a são apresentadas seis classes de natureza distinta no espaço bidimensional. As figuras b e c são exemplos de classificações pelo método do paralelepípedo; em d é exemplificado o método da mínima distância para a média, e em e o método da máxima verossimilhança. A representação tridimensional em permite uma melhor visualização das classes. Extraído de Drury (1987).

Bolstad & Lillesand (1991) apresentaram um algoritmo de classificação supervisionada por máxima verossimilhança otimizado, baseado em "*look-up tables*". Este algoritmo foi desenvolvido especialmente para os sensores Landsat TM, sendo obtida uma precisão de 89 % numa velocidade 21 vezes maior que os algoritmos tradicionalmente utilizados.

Cetin & Levandowski (1991) apresentaram o método de cálculo das funções de densidade de probabilidade n-dimensionais

como alternativa para a classificação de imagens considerando-se todas as **n** bandas disponíveis, sem limitações desta ordem. Para exemplificar a precisão da técnica, uma imagem quadrada com 256 pixels de lado foi analisada por composições coloridas, componentes principais, classificação supervisionada, classificação não supervisionada e nPDF, apresentando o último método melhores resultados que os demais.

O método proposto por Cetin & Levandowski (*op. cit.*) possui caráter iterativo e pode ser aplicado tanto em classificações supervisionadas quanto não supervisionadas.