

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-8117-PUD/45

CURSO:

**RADAR APLICADO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E
PROSPECÇÃO MINERAL: APLICAÇÕES**

Athos Ribeiro dos Santos
Paulo Veneziani
Waldir Renato Paradella
Maria Carolina de Moraes

São José dos Campos - SP
21 - 26 de agosto de 2000

INPE
São José dos Campos
2001

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-8117-PUD/45

CURSO:

**RADAR APLICADO AO MAPEAMENTO GEOLÓGICO E
PROSPECÇÃO MINERAL: APLICAÇÕES**

**Athos Ribeiro dos Santos
Paulo Veneziani
Waldir Renato Paradella
Maria Carolina de Moraes**

**São José dos Campos - SP
21 - 26 de agosto de 2000**

**INPE
São José dos Campos
2001**



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Curso:

**RADAR APLICADO AO MAPEAMENTO
GEOLÓGICO E PROSPECÇÃO MINERAL:
APLICAÇÕES**

A. R. dos Santos
P. Veneziani
W. R. Paradella
M. C. de Moraes

S. J. Campos - SP
21-26 de agosto de 2000



ADIMB

**Agência para o Desenvolvimento
Tecnológico da Indústria Mineral Brasileira**

APLICAÇÕES

CAPÍTULO I

INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DE DADOS SAR

INTRODUÇÃO.....	1
MÉTODOS DE FOTOINTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA.....	2
PROCEDIMENTOS NA INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DE DADOS SAR.....	4
(1) Definição do tipo de análise.....	4
(2) Definição das características dos dados SAR.....	6
(3) Interpretação geológica dos dados SAR.....	12
(a) Identificação dos elementos de imagem.....	12
(b) Análise dos elementos de imagem.....	13
I- Análise das Propriedades das Formas de Drenagem.....	13
II- Análise das Propriedades das Formas de Relevo.....	16
III- Zonas Homólogas.....	18
(c) Interpretação dos Elementos de Imagem.....	19
I- Interpretação dos Elementos Texturais de Relevo e de Drenagem..	19
II- Interpretação das Variações de Tonalidade de Cinza (cenas de radar)	
ou de Matiz (produtos integrados).....	30
III- Modelo Fotointerpretativo.....	32
REFERÊNCIAS.....	32

CAPÍTULO II

PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

INTRODUÇÃO	36
CONTEXTO GEOLÓGICO	37
REFERÊNCIAS	42

CAPÍTULO III

A ESTEREOSCOPIA COM IMAGENS DE RADAR

RESUMO	45
INTRODUÇÃO	45
CONTEXTO GEOLÓGICO	46
A ESTEREOSCOPIA E O RADAR	48
DADOS RADARSAT-1	51
RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
Par S5D x S7D	55
Par S6A x S6A	56
Pares S5D x S5A e S5D x S6A	58
Pares S7D x S5A e S7D x S6A	60
CONCLUSÕES	61
Agradecimentos	62
REFERÊNCIAS	62

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS DA CROMOESTEREOSCOPIA

INTRODUÇÃO.....	65
MÉTODOS DE ESTEREO-VISÃO.....	66
O OLHO COMO UM SENSOR.	67
VISÃO COLORIDA.....	67
PERCEPÇÃO DE PROFUNDIDADE.....	68
CONCEITO DE CROMOESTEREOSCOPIA.....	70
CROMOESTEREOSCOPIA APLICADA AO SENSORIMENTO	
REMOTO... ..	72
ETAPA DE PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO.....	73
ETAPA DE PROCESSAMENTO RADOMÉTRICO.....	74
CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS.....	76

CAPÍTULO V

A ABORDAGEM TEXTURAL EM GEOLOGIA

INTRODUÇÃO.....	78
FUNDAMENTAÇÃO.....	79
MÉTODOS DE ANÁLISE DE TEXTURA.....	81
MEDIDAS DE PRIMEIRA ORDEM.....	82
MEDIDAS DE SEGUNDA ORDEM.....	83
EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE MEDIDAS DE PRIMEIRA E	
SEGUNDA ORDEM EM IMAGENS SAR.....	87
ANÁLISE DE ATRIBUTOS TEXTURAIS.....	89

CONTEXTO.....	89
ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	90
SELEÇÃO DAS MEDIDAS DE TEXTURA.....	92
GERAÇÃO DE IMAGENS DE TEXTURA.....	93
CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS DE RADAR.....	94
REFERÊNCIAS.....	97

CAPÍTULO I

INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DE DADOS SAR

INTRODUÇÃO Desenvolvida inicialmente para as fotografias aéreas, a fotointerpretação geológica tem tido dificuldades para se adaptar e entender as características dos dados, obtidos por uma grande variedade de tipos de sensores e de plataformas de coleta de dados, que se tornaram disponíveis ao longo das últimas décadas. As imagens fotográficas, que eram no princípio branco & preto e pancromáticas, tornaram-se coloridas e multiespectrais, e os sensores ampliaram a sua área de atuação no espectro eletromagnético para além do visível, incluindo regiões do infravermelho próximo ao termal, das microondas, etc.

Os modernos sistemas imageadores instalados em plataformas orbitais, com coberturas repetitivas e, em alguns casos, com geometria de observação controlável, introduzem novas e importantes variáveis na fotointerpretação geológica. Há, agora, a necessidade de se considerar o sistema sensor mais adequado, as melhores bandas espectrais entre as disponíveis, os mais adequados ângulos do azimute e de elevação (ou de incidência) da iluminação, a melhor época do ano em termos de, por exemplo, teor de umidade do solo, vigor da vegetação e cobertura de nuvens, a decisão entre as análises estereoscópica ou monoscópica, etc.

Nos itens seguintes, serão apresentados, sucintamente, os principais métodos de fotointerpretação geológica, as implicações das características dos dados SAR nos procedimentos fotointerpretativos, as adaptações, os cuidados e as complementações necessárias. Estes aspectos serão discutidos considerando-se as análises mono e estereoscópica das cenas SAR, e os produtos integrados digitalmente, onde uma das fontes de dados é o radar.

MÉTODOS DE FOTOINTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA

Os métodos de fotointerpretação geológica, ainda hoje utilizados, foram desenvolvidos, inicialmente, para as fotografias aéreas, e podem ser subdivididos em dois grupos: os métodos comparativos e os métodos da análise lógica.

Os métodos comparativos, ou das chaves, foram os primeiros a serem desenvolvidos e baseiam-se no estabelecimento de padrões (chaves) comparativos. Essas chaves fotointerpretativas podem ser elaboradas de forma que sejam aplicadas em: (1) uma determinada área, (2) uma determinada categoria (p. ex.: um tipo litológico), (3) uma associação (de categorias e/ou áreas). Além disso, essas chaves podem ser visuais (uma imagem é comparada com outra), ou descritivas (pressupõe-se que as características fotográficas, descritas para uma determinada feição geológica, sejam as mesmas em outras áreas). Detalhes em Lueder (1959), Miller & Miller (1961), Ricci & Petri (1965), Vergara (1971). As limitações na utilização dessas chaves, segundo alguns autores (Soares & Fiori, 1976; Veneziani e Anjos, 1982), estão na falta de regras sistemáticas, o que induz uma forte parcela de subjetividade nos procedimentos fotointerpretativos.

Os primeiros estudos, que buscaram empregar a análise lógica na interpretação de imagens fotográficas, foram apresentados na França, por Guy (1966). Os conceitos desenvolvidos a partir desses estudos foram publicados no Brasil por Rivereau (1970), como resultado de um curso de fotointerpretação, ministrado na Escola de Minas, de Ouro Preto.

Soares & Fiori (1976), retomando os mesmos conceitos dos autores franceses, procuraram organizar o conjunto de conhecimentos que permite a análise lógica das imagens fotográficas, apresentando procedimentos fotointerpretativos voltados para as ciências da Terra, desenvolvidos de forma sistemática, codificada e lógica. Os autores subdividiram a interpretação de imagens fotográficas em três processos: (1) *fotoleitura*, que envolve a identificação dos elementos de imagem com as feições de superfície; (2) *fotoanálise*, que estuda as relações entre as feições de imagem e; (3) *fotointerpretação*, que busca a descoberta e/ou avaliação do significado dos objetos e de suas relações.

Com a chegada dos primeiros satélites de recursos naturais (série Landsat), Veneziani & Anjos (1982) adaptaram os critérios propostos por Soares & Fiori (1976), para as imagens multiespectrais, de baixa resolução espacial e sem o recurso da visão estereoscópica.

Baseado em sua experiência na análise de dados do Projeto RADAM, Lima (1989, 1995) propôs um método de interpretação geológica de imagens de Radar de Visada Lateral (RVL), denominado de Sistemática das Chaves. Segundo o autor, a metodologia conjuga aspectos dos métodos da análise lógica e das chaves, e é desenvolvida em cinco etapas principais: (1) leitura (significado dos elementos de imagem no terreno), (2) reconhecimento (delimitação das zonas homogêneas em termos de textura e tom radargráficos), (3) identificação (estudo das formas de relevo, dos padrões de drenagem, grau de dissecação e resistência à erosão, nas zonas homogêneas), (4) análise (relações espacial e temporal das formas de relevo, através das feições lineares, planares e tabulares), (5) interpretação (definição de: litologias, estruturas circulares, descontinuidades, dobras e suas inter-relações).

O início de operação dos modernos sistemas orbitais SAR (SEASAT, ALMAZ-1, ERS-1 e 2, JERS-1 e RADARSAT-1 e, em breve, RADARSAT-2, EnviSAT-1 e PALSAR), introduz uma série de novas variáveis aos dados disponíveis, intrínsecas ao próprio sensor e à plataforma de coleta de dados, obrigando, aos usuários, a uma completa reavaliação nos critérios e procedimentos de fotointerpretação geológica (Paradella *et al.* 1997, 1999; Santos *et al.* 1997). Por serem sensores ativos, com o controle da própria iluminação, as possibilidades de alteração da geometria de visada são, em alguns casos, muito amplas. Isso ocorre, principalmente, no caso do RADARSAT-1, onde o ângulo de incidência pode variar de 10 a 59° e, os azimutes de iluminação, nas latitudes equatoriais, são de 78 e 282°, respectivamente, nas órbitas ascendente e descendente. Estas variações permitem que uma mesma área seja vista das mais diferentes perspectivas, de modo que as cenas possam ser escolhidas, de acordo com as características da área (tipo de relevo, orientação das estruturas geológicas, etc.), tanto para uma análise mono como estéreo. Além desses aspectos, as imagens SAR apresentam características únicas de efeitos de relevo

(foreshortening, layover e sombreamento) e, de comportamentos distintos da macro e da micro-topografia na modulação do sinal retroespalhado de radar. O entendimento dessas peculiaridades do imageamento de radar é essencial, tanto na escolha das cenas, quanto nos procedimentos de interpretação geológica dos dados SAR, principalmente quando se considera a análise estereoscópica, fundamentalmente diferente da visão tridimensional óptica (Santos *et al.* 1999) .

A disponibilidade no formato digital desses dados SAR, levou ao desenvolvimento recente de técnicas que permitem a sua integração com outros tipos de dados, nos assim denominados produtos multifonte (Harris *et al.* 1994, Toutin 1995, Paradella *et al.* 1997). A partir de então, abre-se um vasto campo de combinações entre o radar e outros conjuntos de informações (sensores ópticos, dados geofísicos, geoquímicos, etc.). Cria-se, então, a necessidade de desenvolver novas sistemáticas de fotointerpretação geológica, que levem em consideração as características dos dois conjuntos de dados, integrados digitalmente em um produto fotográfico.

PROCEDIMENTOS NA INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA DE DADOS SAR Um procedimento completo de interpretação geológica de dados SAR envolve, pelo menos, três fases principais: (1) *definição do tipo de análise* (mono, estéreo ou produtos integrados); (2) *definição das características dos dados SAR* (ângulos de incidência, do azimute de iluminação, de interseção estereoscópica e de interseção entre órbitas, resolução espacial, áreas de cobertura e de superposição, banda de radar e polarização) e; (3) *interpretação geológica* (identificação, análise e interpretação das feições de imagem).

(1) Definição do tipo de análise. A decisão entre as análises monoscópica e estereoscópica deve considerar diversos aspectos. Em primeiro lugar, a opção estereoscópica requer que a área analisada seja totalmente recoberta pelas cenas de radar do(s) estéreo-par(es). Isso nem sempre é possível, como exemplificado com imagens RADARSAT-1, por D'Iorio *et al.* (1997). Segundo esses autores, nas latitudes equatoriais, enquanto um par de cenas no modo standard S1/S6 apresenta uma área de superposição de 96%, um outro par standard S3/S4 tem apenas 30% de recobrimento, chegando a 0% no caso de um par fine F1/F2. A

evidente maior efetividade da percepção tridimensional, em comparação à visão monoscópica, deve ser contraposta à questão do aumento de custos para a aquisição das imagens SAR, fato que se torna ainda mais crítico, quanto menor for a área de superposição entre as cenas do par.

Um outro aspecto importante a ser considerado, refere-se a precisão geométrica requerida pela análise, já que as imagens utilizadas estereoscopicamente, ao contrário das usadas monoscopicamente, não devem ser submetidas a correções geométricas (ortorretificação), para que mantenham a paralaxe necessária. Portanto, uma cartografia geológica, obtida a partir da análise monoscópica, apresentará uma melhor precisão geométrica, comparada com a estereoscópica, desde que as cenas de radar estejam ortorretificadas. Utilizando-se de imagens RADARSAT-1 não ortorretificadas, Toutin (1998) concluiu que, na geração de modelos digitais de elevação (“DEM – Digital Elevation Model”), o uso da estereoscopia melhora a acurácia da altimetria de 20 a 40%, com imagens standard e, a acurácia da planimetria, obtida pelo autor, foi da ordem de um celda de resolução (7 a 9 metros), em um par estereoscópico fine F1/F5.

Um terceiro ponto a ser considerado, na decisão entre os dois tipos de análises, reside na ponderação entre a efetividade da estereoscopia e a praticidade da monoscopia. Como concluído por Santos *et al.* (1999), a experiência do fotointérprete, no uso da estereoscopia de radar, representa um papel vital na extração de informação geológica, particularmente em relevos acidentados, com estéreo-pares de radar com visadas opostas. Neste caso, há uma grande dificuldade de *visibilidade estereoscópica*, que só é superada, ao menos parcialmente, com a experiência.

Há, também, o caso particular da utilização dos produtos integrados digitalmente, onde a interpretação monoscópica dos dados SAR é complementada com outro conjunto de informações. Neste caso, as considerações estão relacionadas à disponibilidade e compatibilidade dos dados existentes e, naturalmente, aos custos envolvidos no tratamento e integração desses dados digitais.

(2) Definição das características dos dados SAR. É de importância fundamental a definição das características dos dados SAR a serem utilizados, pois elas irão determinar a maior ou menor efetividade do radar na interpretação geológica. A tabela 1 especifica as principais características técnicas, de importância para a interpretação geológica, dos sensores SAR instalados nas principais plataformas orbitais já lançadas. Nas tabelas 2, 3 e 4 encontram-se algumas das características técnicas dos dados SAR dos principais satélites de recursos naturais a serem colocados em operação, brevemente, pela European Space Agency – ESA (EnviSAT-1), pela Canadian Space Agency - CSA (RADARSAT-2) e pela National Space Development Agency of Japan – NASDA (ALOS). Estas tabelas apenas exemplificam os sensores SAR das principais plataformas orbitais de cobertura repetitiva. Porém, além desses produtos, há uma vasta quantidade de outros dados de radar, resultantes de missões, geralmente com áreas mais restritas, a começar pelo próprio Projeto RADAM, pelas coberturas orbitais como a do SIR-C e, pelos aerolevantamentos, como o do Projeto SAREX-92.

A mais importante característica dos dados SAR, a ser avaliada, inicialmente, é o *ângulo de incidência* de iluminação das cenas, pois ele é determinante com relação a intensidade dos efeitos de relevo (foreshortening, layover e sombreamento) e, da macro e da micro-topografia na modulação do sinal retroespalhado de radar. Além disso, no caso da análise estereoscópica, é o ângulo de incidência das cenas do par que irá determinar a paralaxe (disparidade geométrica) e a visibilidade estereoscópica (similaridade radiométrica).

O valor do ângulo de incidência tem uma relação inversa com os efeitos de foreshortening e layover, e direta com o sombreamento de radar. A magnitude desses efeitos, no entanto, depende do *tipo de relevo* da área imageada. Assim, em uma área com relevo montanhoso, imagens de radar com pequenos ângulos de incidência (como as imagens no modo Extended Low do RADARSAT-1, ou mesmo imagens ERS, respectivamente, com ângulos de incidência de 10-23° e 20,1-25,9°) apresentarão efeitos tão intensos de foreshortening e, principalmente de layover, que tornarão a sua utilização impraticável para quaisquer

Tabela 1: Características dos sensores SAR dos principais satélites de recursos naturais já lançados (Fontes: RADARSAT International 1995, ESA 1999, NASA 1999, NASDA 1999).

Satélite	Banda (freq.)	Pol.	Modo		Posição	Area de Cobertura (Km)	Ângulo de incidência (near x far)	Resolução Espacial (m)	Azimute de Iluminação*
SEASAT	L(1,2GHz)	HH				40x40	20,0-26,0°	25,0x25,0	
ALMAZ-1	S(3,1GHz)	HH	Standard		SR	40x40	32,0-50,0°	11,0x18,0	
			Experimental		ER-1		20,0-32,0°		
					ER-2		50,0-70,0°		
ERS-1e2	C(5,3GHz)	VV				100x100	20,1-25,9°	26,3x30,0	78 e 282°
JERS-1	L (1,2GHz)	HH				75x75	38,5°(nom.)	18,0x18,0	78 e 282°
RADARSAT I	C (5,3GHz)	HH	FINE		F1	50x50	37-40°	9,1x8,4	78 e 282°
					F2		39-42°	8,7x8,4	
					F3		41-44°	8,4x8,4	
					F4		43-46°	8,1x8,4	
					F5		45-48°	7,8x8,4	
			STANDARD		S1	100x100	20-27°	26,0x27,0	
					S2		24-31°	22,0x27,0	
					S3		30-37°	27,6x27,0	
					S4		34-40°	25,7x27,0	
					S5		36-42°	24,2x27,0	
					S6		41-46°	22,1x27,0	
					S7		45-49°	20,1x27,0	
			WIDE		W1	150x150	20-31°	35,5x27,0	
					W2		31-39°	26,6x27,0	
					W3		39-45°	22,8x27,0	
			SCANSAR	NARROW	SN1	300x300	20-40°	73,5x47,8	
					SN2		31-46°	55,1x71,1	
				WIDE	SW1	500x500	20-49°	146,8 x93,1	
					SW2		20-46°		
			EXTENDED	HIGH	H1	75x75	49-52°	19,8x27,0	
					H2		50-53°	19,4x27,0	
					H3		52-55°	19,1x27,0	
					H4		54-57°	18,5x27,0	
					H5		56-68°	18,2x27,0	
					H6		57-59°	18,0x27,0	
				LOW	L1	170x170	10-23°	36,3x27,0	

*para latitudes equatoriais

Tabela 2: Principais características do sensor ASAR (Advanced SAR) do satélite EnviSAT– (Fonte: EnviSAT 1999).

Satélite	Banda (freq.)	Pol.	Modo	Posição	Largura da faixa* (Km)	Angulo de Incidência* (near x far)	Resolução Espacial (m)	Azimute de Iluminação**
ENVISAT 1	C (5,3GHz)	HH VV	Global Monitoring	IS2-IS6	405	18,5 – 42,7°	1000,0	78 e 282°
			Wide Swath				150,0	
			HH/VV HH/HV VV/VH	Image Alternating Polarization	IS1	108,7	14,2 – 22,2°	
		IS2			107,4	18,5 – 26,1°		
		IS3			84,1	25,7 – 31,2°		
		IS4			90,3	30,7 – 36,1°		
		IS5			65,8	35,6 – 39,3°		
		IS6			72,5	38,9 – 42,7°		
		IS7			57,9	42,4 – 45,2°		

* valores médios

** valores estimados para latitudes equatoriais

Tabela 3: Principais características do sensor SAR do satélite RADARSAT-2 (Fonte: RADARSAT 1999)

Satélite	Banda (freq.)	Pol.	Modo	Largura da Faixa (Km)	Ângulo de Incidência	Resolução Espacial (m)	Azimute de Iluminação*
R A D A R S A T 2	C(5,3GHz)	HH,VV HV,VH	Standard	100	20-50°	25x28	78 e 282°
			Wide	150	20-45°	24x28	
			Low Incidence	170	10-20°	40x28	
			High Incidence	70	50-60°	20x28	
			Fine	50	37-48°	10x9	
			ScanSAR Wide	500	20-50°	100x100	
			ScanSAR Narrow	300	20-46°	50x50	
			Standard Quad Polarization	25	20-41°	25x28	
			Fine Quad Polarization	25	30-41°	11x9	
			Triple Fine	50	30-50°	11x9	
			Ultra Fine Wide	20	30-40°	3x3	
			Ultra Fine Narrow	10	30-40°	3x3	

*valores estimados para latitudes equatoriais

procedimento de fotointerpretação geológica. Com o aumento do ângulo de incidência, nesse tipo de relevo, há uma gradativa diminuição dessas distorções e um aumento da área sombreada, que representa regiões sem nenhuma informação. Deve-se buscar, portanto, o ângulo de incidência que resulte nos menores efeitos possíveis de deslocamento de relevo e,

ao mesmo tempo, a perda de informação através da sombra de radar não seja muito expressiva.

Tabela 4: Principais características do sensor PALSAR do satélite ALOS (Fonte: Wakabayashi *et al.* 1998)

Sensor	Banda	Modo	Intervalo de Incidência (graus)	Número de Posições	Polarização	Intervalo de Resolução (m)	Largura da Faixa (Km)
P A L S A R	L	Fine	8,0-60,0	18	HH ou VV	7,0-44,3	40-70
					HH+HV ou VV+VH	14,0-88,6	40-70
		ScanSAR	18,0-43,0	5	HH ou VV	100 (multi-look)	250-350
		Direct Downlink	8,0-60,0	18	HH ou VV	14,0-88,6	40-70
		Polarimetric	8,0-30,0	5	HH+HV + VH+VV	24,1-88,6	20-65

Em uma área de topografia plana, a relação entre o ângulo de incidência e os efeitos de relevo é diferente daquela observada em áreas de relevo movimentado. Aqui, todos os três efeitos de relevo (foreshortening, layover e sombreamento) são minimizados, mesmo em imagens SAR com pequenos ângulos de incidência. Enquanto que, em regiões montanhosas a macro-topografia é o principal modulador do sinal retroespalhado de radar, em áreas de relevo plano esse papel é exercido, preponderantemente, pela micro-topografia (rugosidade a nível de comprimento de onda). A utilização de dados SAR com pequenos ângulos de incidência é aconselhável em áreas de relevo plano, pois o efeito da micro-topografia, como modulador do sinal de radar, é realçado a medida que este ângulo diminui.

No caso da análise estereoscópica, a correta escolha dos ângulos de incidência das cenas do par é fundamental, pois dela dependem dois importantes indicadores da performance da análise: o *ângulo de interseção estereoscópica* e o *índice razão de paralaxe vertical (RPV)*. O ângulo de interseção estereoscópica, que é dado pela diferença entre os ângulos de incidência das duas cenas do par, é o principal indicador da *visibilidade estereoscópica* do par de cenas de radar. O aumento do valor do ângulo de interseção estereoscópica diminui a

correlação radiométrica entre as cenas, levando a uma redução na visibilidade estereoscópica, que pode, sob certas condições de geometria de iluminação do par e de relevo do terreno, provocar serias restrições na percepção de profundidade. Essa situação ocorre, principalmente, na estereoscopia de sentidos opostos, em áreas de topografia acidentada. Em áreas planas, as cenas do par apresentarão boa correlação radiométrica, mesmo com altos ângulos de interseção estereoscópica.

O índice *Razão de Paralaxe Vertical* ($p/h = [\cot d - \cot e]$, onde p é a paralaxe, h a elevação do alvo e d e e os ângulos de incidência das imagens da direita e da esquerda no par estereoscópico, respectivamente), proposto por Toutin (1998), tem relação direta com a paralaxe, e é utilizado para avaliar a configuração estéreo de um par de cenas de radar. Quanto maior for o índice, melhor será a configuração geométrica do par (maior paralaxe), e, portanto, maiores serão os detalhes na percepção de profundidade. No entanto, como na maioria das vezes, um maior índice RPV representa, também, um aumento no ângulo de interseção estereoscópica, deve-se ponderar entre a melhoria da paralaxe e a diminuição da visibilidade estereoscópica.

O ângulo de interseção entre as órbitas das cenas do par é uma outra variável, que pode influenciar a visibilidade estereoscópica. Para que haja percepção estereoscópica, este ângulo não deve ser maior do que 40° (Kobrick *et al.* 1986, Toutin 1996). No caso dos satélites RADARSAT-1, ERS-1 e 2 e JERS, esses ângulos são, aproximadamente, 0° na estereoscopia de mesmo sentido e 24° na de sentidos opostos. A dificuldade de percepção estereoscópica acontece quando esse ângulo é diferente de zero, pois cria-se uma nova perspectiva, em que um objeto é iluminado, nas duas cenas de radar, de acordo com um ângulo oblíquo (no exemplo da estereoscopia de sentidos opostos, $180-24=156^\circ$).

Um outro aspecto muito importante na interpretação geológica dos dados SAR é a correta escolha do azimuth de iluminação das cenas. O *azimuth de iluminação* define a orientação da iluminação de radar (a geometria de observação de um SAR é definida pelos ângulos de incidência e do azimuth de iluminação) e, conseqüentemente, as feições de superfície (macro-topografia) que serão mais ou menos realçadas, de acordo com a sua

posição em relação à esse ângulo. O maior realce das feições geológicas de interesse (normalmente o trend estrutural principal da área) é obtido quando elas estão posicionadas ortogonalmente à iluminação. Com a diminuição desse ângulo há um esmaecimento das feições de superfície do terreno, podendo chegar a sua supressão total, com o paralelismo à iluminação.

Os diversos sistemas sensores de radar disponíveis utilizam diferentes intervalos espectrais (bandas), dentro da região das microondas. As *bandas de radar* apresentam intervalos de comprimentos de onda que variam de 7,5-11,0 mm. (banda Ka) a 30,0-100,0 cm. (banda P). De uma maneira geral, o comprimento de onda da radiação incidente determina a rugosidade relativa da superfície considerada. Isso significa que, o efeito da micro-topografia (para uma mesma incidência) está inversamente relacionado ao comprimento de onda utilizado pelo sensor.

As características *resolução espacial e área de cobertura* das cenas SAR estão, naturalmente, relacionadas à escala de trabalho que se pretende desenvolver. Exemplificando com produtos do RADARSAT-1: (a) cenas no modo ScanSAR Wide, com área de cobertura nominal de 500x500 quilômetros e resolução nominal de 100 metros, são ideais para estudos regionais de integração de dados (p. ex. grandes unidades tectônicas), em escalas menores do que 1:500.000; (b) cenas no modo Standard, com área de cobertura nominal de 100x100 quilômetros e resolução nominal de 30 metros, são ferramentas úteis em mapeamentos regionais, com escalas entre 1:500.000 e 1:100.000, e (c) cenas no modo Fine, com área de cobertura nominal de 50x50 quilômetros e resolução nominal de 10 metros, fornecem subsídios para trabalhos geológicos até ao nível da escala de 1:50.000.

A reflexibilidade das microondas de um determinado objeto, depende da relação entre a *polarização* e a estrutura geométrica do objeto. As cenas de radar com polarizações de mesmo sentido (HH e VV) apresentam sinais de retorno mais fortes do que as imagens com polarizações cruzadas (HV e VH), que requerem múltiplo espalhamento pelo alvo. Isso implica que as imagens com polarização cruzada apresentam, normalmente, qualidade inferior. Cada uma das polarizações apresenta algumas afinidades em termos de aplicação,

apesar da complexidade de comportamento do sinal retroespalhado, devido a diversidade das características dos alvos que compõem uma determinada cena. Segundo CCRS (1999), imagens de radar com polarização HH apresentam melhor penetração na vegetação, do que as imagens com polarização VV e polarização cruzada, e tem boa aplicação em estudos de variações de umidade no solo. Já, as imagens de radar com polarização VV apresentam boa sensibilidade em relação a rugosidade de pequena escala (capilaridade). Os dados SAR com polarização cruzada tendem a ser mais eficientes na detecção de estruturas geológicas lineares, principalmente quando observadas em ângulo agudo.

(3) Interpretação geológica de dados SAR. Este item é baseado na metodologia desenvolvida por diversos autores (ver item Métodos de Fotointerpretação Geológica), a partir dos conceitos propostos pela escola francesa, buscando-se, aqui, adaptá-la às características dos dados SAR. Como já citado anteriormente, a interpretação geológica dos dados SAR pode ser subdividida em três etapas sequenciais:

(a) IDENTIFICAÇÃO DOS ELEMENTOS DE IMAGEM

Na interpretação geológica, é fundamental a identificação, na imagem de radar, dos elementos naturais de paisagem, em especial aqueles que determinam a morfologia superficial do terreno: o relevo e a drenagem. Além disso, a tonalidade em uma imagem de radar está relacionada, em muitos casos, à importantes feições de paisagem (naturais ou não).

Em uma imagem de radar, a sensação de relevo (percepção de profundidade) nos é dada, principalmente, por um processo psicológico denominado “shade and shadows” (Toutin & Vester 1997). Este processo nos dá a impressão de concavidade e convexidade, através das nuances de sombra, causadas pelas variações de iluminação. No caso da visão estereoscópica de radar, é a paralaxe do par que determina o nível de detalhe na percepção tridimensional e, portanto, a identificação dos elementos naturais de paisagem.

Em um produto integrado, os dados SAR representam a morfologia do terreno, dando fundamento à identificação dos elementos naturais de paisagem, à análise da distribuição e inter-relação desses elementos, e sua associação à um significado geológico. Os outros conjuntos de dados (gama, mag, TM, etc.) que podem estar associados ao radar, são representados em um produto integrado como variações de matiz. A identificação dessas variações e a compreensão de seu significado, permitem que um conjunto importante de informações seja adicionado aos dados SAR.

(b) ANÁLISE DOS ELEMENTOS DE IMAGEM

Esta etapa trata do estudo da disposição e ordenamento dos elementos identificados na imagem. O menor elemento de imagem, identificável e passível de repetição, é denominado de elemento textural. A textura de uma imagem de radar é dada, portanto, pelo arranjo dos elementos texturais. A estrutura de uma imagem fotográfica estabelece a lei de organização que exprime a disposição espacial (ordenada ou não) dos elementos texturais. Por fim, uma forma define o espaço onde estão agrupados os elementos texturais com propriedades comuns. Exemplificando: sendo elementos texturais as feições lineares de drenagem, organizadas no espaço segundo uma lei bem definida que resulta em uma estrutura radial, a configuração final será uma forma radial de drenagem.

As formas de relevo e de drenagem, constituídas pelos dois principais elementos texturais de uma imagem de radar, são definidas por conjuntos específicos de propriedades, que serão descritas, à seguir.

I - Análise das Propriedades das Formas de Drenagem

As formas de drenagem são, sem dúvida, os mais importantes elementos de análise em uma interpretação geológica de dados SAR. É fundamental o traçado dos canais de drenagem, tão detalhado quanto possível, para a análise de suas propriedades, que fornecerá importantes subsídios para as interpretações sobre os tipos litológicos e as estruturas geológicas. A rede de drenagem deve, inicialmente, ser obtida a partir de cartas topográficas preexistentes, em escalas compatíveis com as das imagens de radar disponíveis

e, posteriormente, completada com o maior nível de detalhe possível, com a utilização dos dados SAR. A redução da escala original da rede de drenagem e o uso da estereoscopia com o intuito de aumentar o nível de detalhe, são estratégias importantes na análise das propriedades (de textura e de estrutura) das formas de drenagem. Para se definir de modo completo e adequado as propriedades das formas, é necessário iniciar-se o trabalho analisando as propriedades dos elementos texturais, essencialmente aqueles que apresentam um significado geológico, isto é, os retilíneos à ligeiramente curvos.

Propriedades dos elementos texturais de drenagem:

- (1) Frequência. É dada pela relação entre o número de elementos texturais de drenagem por unidade de área.
- (2) Feições lineares. São elementos texturais de drenagem fortemente estruturados, retilíneos ou curvos.
- (3) Alinhamentos. São definidos pela disposição geométrica, alinhada e fortemente estruturada das feições lineares de drenagem.
- (4) Tropia. Refere-se às orientações das feições lineares de drenagem em uma ou mais direções. Uma forma é anisotrópica quando apresenta orientações bem definidas. Isto é, quando as feições lineares definem um *trend* orientado segundo uma direção qualquer, a anisotropia é dita unidirecional, segundo duas direções é bidirecional, segundo três é tridirecional, etc. quando as orientações estão dispersas nos quatro quadrantes então a forma é isotrópica. Se existir uma ordem na distribuição dos elementos pelos quadrantes (p. ex.: formas radial, circular, elíptica, etc.), a forma é isotrópica multidirecional ordenada. Caso a distribuição seja caótica, a forma é isotrópica multidirecional desordenada.
- (5) Assimetria. Analisa o tamanho, a forma e a organização dos elementos de drenagem, em ambos os lados de um canal de ordem superior, considerando-se que as ravinas são as feições de primeira ordem. Quando o canal de ordem superior representa uma linha que separa formas de drenagem com tamanho, forma e organização semelhantes, o padrão de drenagem é simétrico. Caso contrário, é assimétrico e, quanto maiores forem as diferenças, maior será a assimetria. Desta maneira, as formas de drenagem podem ser classificadas, quanto a assimetria, em: simétrica, moderadamente assimétrica e fortemente assimétrica

- (6) Homogeneidade. Descreve o quanto as propriedades texturais de drenagem são constantes na área analisada. Se as propriedades não variam (a frequência é sempre constante; as feições lineares e alinhamentos são sempre retilíneos, ou ligeiramente curvos, ou uma combinação dos dois; a anisotropia – isotropia e a assimetria – simetria não variam na área analisada) a drenagem é dita homogênea. Caso existam variações, a drenagem pode ser classificada em: moderadamente homogênea, pouco homogênea e heterogênea.

A partir da análise das propriedades dos elementos texturais de drenagem estabelece-se o quadro das propriedades das formas:

- (1) Frequência textural. Já definida anteriormente. É uma das propriedades mais importantes pois define zonas homólogas.
- (2) Estrutura. É a lei que exprime a disposição espacial dos elementos texturais de drenagem.
- (3) Grau de estruturação. Descreve o nível de organização dos elementos texturais de drenagem, ou seja, o quanto estão organizados no espaço. O grau de estruturação é obtido analisando-se a existência e as orientações dos alinhamentos e, a isotropia – anisotropia da drenagem. Por exemplo, se em uma determinada área, os alinhamentos são orientados segundo uma direção qualquer, dando origem a um sistema paralelo, e a anisotropia for unidirecional e também paralela a este sistema, a forma de drenagem é estruturada. Por outro lado, se em uma determinada área existem duas direções preferenciais para os alinhamentos e a anisotropia também for bidirecional, o grau de estruturação desta área será maior do que da anterior. Assim, quanto mais complexa for a lei de organização dos elementos texturais, maior será o grau de estruturação. A forma de drenagem, portanto, pode ser classificada nos seguintes graus de estruturação: baixo, moderado, alto, muito alto, etc.
- (4) Ordem de estruturação. Ordena, em função da complexidade de organização dos elementos texturais, as diferentes formas de drenagem. O grau de estruturação quantifica e a ordem de estruturação qualifica. Por exemplo, uma forma de drenagem paralela (anisotropia unidirecional preferencial) tem um baixa ordem de estruturação quando comparada com uma forma anelar (tropia multidirecional ordenada). Portanto,

neste caso, a forma paralela é de 1ª ordem de estruturação e a anular de 2ª, isto é apresenta uma maior complexidade de organização dos elementos texturais. A ordem de estruturação das formas de drenagem pode ser classificada em: 1ª, 2ª, 3ª, 4ª, etc., ordens.

II - Análise das Propriedades das Formas de Relevo

O elemento textural de relevo é definido como qualquer feição positiva, contínua e homogênea, delimitada por rupturas de declive, identificável em uma imagem fotográfica. Diferentemente da drenagem, o elemento textural de relevo é definido tridimensionalmente, o que torna mais difícil a sua cartografia em uma imagem de radar. A análise das propriedades das formas de relevo é, por esse motivo, realizada diretamente sobre a imagem. É importante o auxílio da estereoscopia de radar com o objetivo de facilitar a percepção e aumentar o nível de detalhe, na análise dos elementos texturais de relevo.

Propriedades dos elementos texturais de relevo:

- (1) Frequência. É dada pela relação entre o número de elementos texturais de relevo por unidade de área.
- (2) Feições lineares. São elementos texturais de relevo fortemente estruturados, retilíneos ou curvos.
- (3) Alinhamentos. São definidos pela disposição geométrica, alinhada e fortemente estruturada das feições lineares de relevo.
- (4) Tropia. Refere-se às orientações das feições lineares de relevo em uma ou mais direções. A sua classificação segue os mesmos padrões descritos para a drenagem.
- (5) Quebra positiva de relevo. São as formas alçadas de relevo, ou seja, as cristas (disposição fortemente estruturada das rupturas de declive com convexidade voltada para cima).
- (6) Quebra negativa de relevo. São as formas rebaixadas no relevo (disposição fortemente estruturada das rupturas de declive com concavidade voltada para cima).
- (7) Assimetria. Quanto maior for a diferença entre as declividades das encostas, em ambos os lados de uma crista (quebra positiva de relevo), maior será o grau de assimetria do relevo. Quando as duas encostas apresentarem a mesma declividade o relevo é dito simétrico. De acordo com a diferença entre as declividades, em ambos os lados da

crista, o relevo pode ser classificado em: fracamente assimétrico, moderadamente assimétrico, fortemente assimétrico, etc.

- (8) Forma das vertentes. São definidas pelo perfil predominante das vertentes. Podem ser classificadas em: côncavo, convexo ou retilíneo, ou ainda, uma combinação dessas formas
- (9) Homogeneidade. Descreve o quanto as propriedades texturais de relevo são constantes na área analisada. A sua classificação segue os mesmos padrões descritos para a drenagem.

A partir da análise dos elementos texturais de relevo estabelece-se o quadro das propriedades das forma:

- (1) Frequência textural. Já definida anteriormente. É uma das propriedades mais importantes pois define zonas homólogas.
- (2) Estrutura. É a lei que exprime a disposição espacial dos elementos texturais de relevo.
- (3) Grau de estruturação. Descreve o nível de organização dos elementos texturais de relevo. A sua caracterização e classificação segue os mesmos preceitos e padrões descritos para a drenagem.
- (5) Ordem de estruturação. Ordena, em função da complexidade de organização dos elementos texturais, as diferentes formas de drenagem. A sua caracterização e classificação segue os mesmos preceitos e padrões descritos para a drenagem.

Alem das formas de relevo e de drenagem, outros elementos de imagem devem ser analisados: a tonalidade, no caso de uma imagem de radar, e o matiz, no caso de um produto integrado multifonte. As análises, em ambos os casos, são totalmente distintas. A tonalidade é o resultado direto da interação entre a radiação de microondas e as características dos alvos superficiais, o que irá determinar o nível de intensidade de resposta do sinal. Já, o matiz, em um produto integrado, responde às características de um outro conjunto de dados associado ao radar. O significado, em uma interpretação geológica, das variações de tonalidade de radar e de matiz, em alguns produtos integrados aqui exemplificados, serão discutidos mais adiante, no item (c) Interpretação dos elementos de imagem.

III - Zonas Homólogas

A partir da análise e descrição das propriedades que definem as formas (de drenagem ou de relevo), procede-se a organização e repartição da imagem de radar em zonas homólogas, formadas pela repetição dos mesmos elementos texturais, e com as mesmas propriedades de textura e estrutura. Há, portanto, zonas homólogas de relevo e de drenagem. Duas zonas homólogas contíguas representam áreas com diferentes propriedades de textura e estrutura. O limite entre essas zonas nem sempre é bem definido, como ocorre, por exemplo, quando ele é marcado por uma quebra negativa de relevo ou por um alinhamento de drenagem. Muitas vezes as propriedades mudam gradual ou difusamente, e o limite, nesses casos, é aproximado.

Através da análise conjunta das propriedades que caracterizam as formas, descritas nos itens anteriores, é possível individualizar em imagens de radar as diferentes zonas homólogas, as quais refletem diferentes condições geológicas. Deve ser elaborado um mapa de fotoanálise, obedecendo a seguinte seqüência:

- (1) Delimitação de todas as feições lineares (retilíneas a ligeiramente curvas) de relevo e de drenagem. As primeiras devem ser obtidas colocando-se um *overlay* diretamente sobre a imagem. As segundas, colocando-se o mesmo *overlay* sobre o mapa da rede de drenagem, previamente elaborado. Os traços das feições lineares, das duas análises, devem conter símbolos que indiquem a simetria – assimetria;
- (2) Traçado das quebras negativas de relevo, que coincidem com os contatos geológicos (discussão no item seguinte). Quando as quebras não podem ser identificadas, o procedimento deve ser baseado no traçado de limites em função da frequência textural do relevo e da drenagem, pois esta propriedade, por si só, define zonas homólogas. A delimitação destes limites deve ser feita sobre o *overlay* que contem as feições lineares;
- (3) Traçado dos alinhamentos de relevo e/ou de drenagem. Para melhor clareza é interessante usar cores diferentes para as feições lineares de drenagem, para as de relevo, para os limites e para os alinhamentos;
- (4) Finalmente, elabora-se um quadro – legenda para a descrição das propriedades dos elementos texturais e das formas, exemplificado, a seguir, na figura 1.

(c) INTERPRETAÇÃO DOS ELEMENTOS DE IMAGEM

A interpretação geológica de dados SAR é desenvolvida a partir dos resultados da análise dos elementos texturais (relevo e drenagem) e, da tonalidade (imagem de radar) ou do matiz (produto integrado). O objetivo desta fase é associar um significado geológico aos elementos de imagem (e suas relações) analisados.

I - Interpretação dos Elementos Texturais de Relevo e de Drenagem

Há, na maioria das vezes, uma relação simples e direta entre as propriedades da forma e as propriedades do objeto. A associação de todas as propriedades que definem uma forma com as propriedades do objeto, é a finalidade de uma interpretação geológica em uma imagem de radar. Essa associação só é possível porque as propriedades de textura e estrutura, que definem as formas de relevo e de drenagem, são controladas por uma série de fatores, entre os quais os mais importantes são os morfogenéticos, os litológicos e os deformacionais.

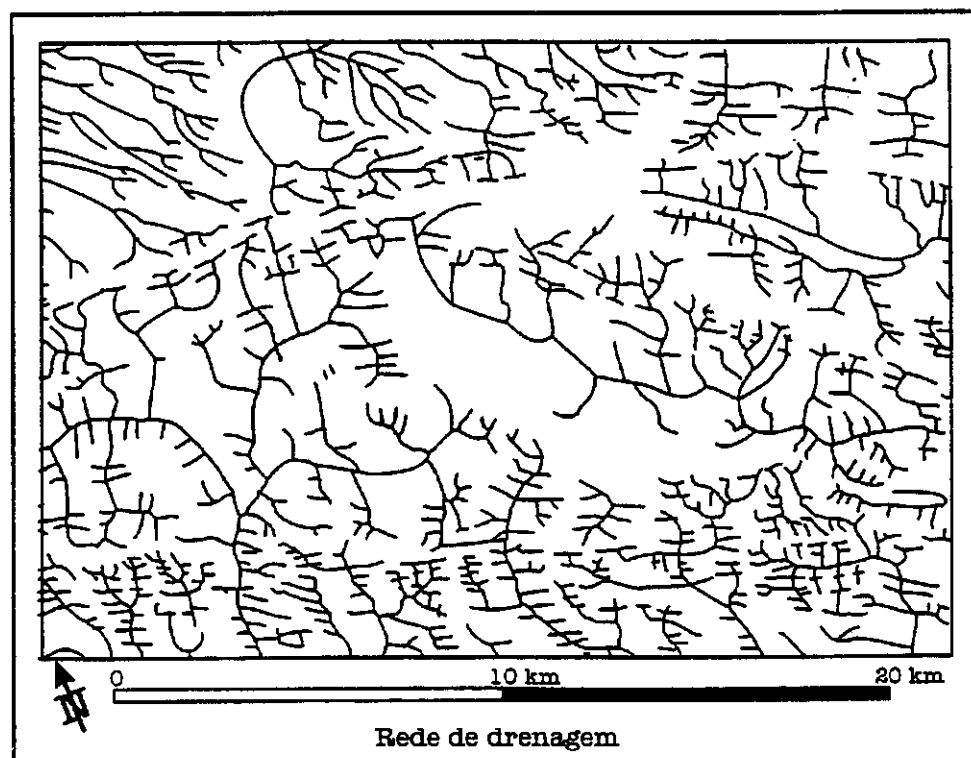
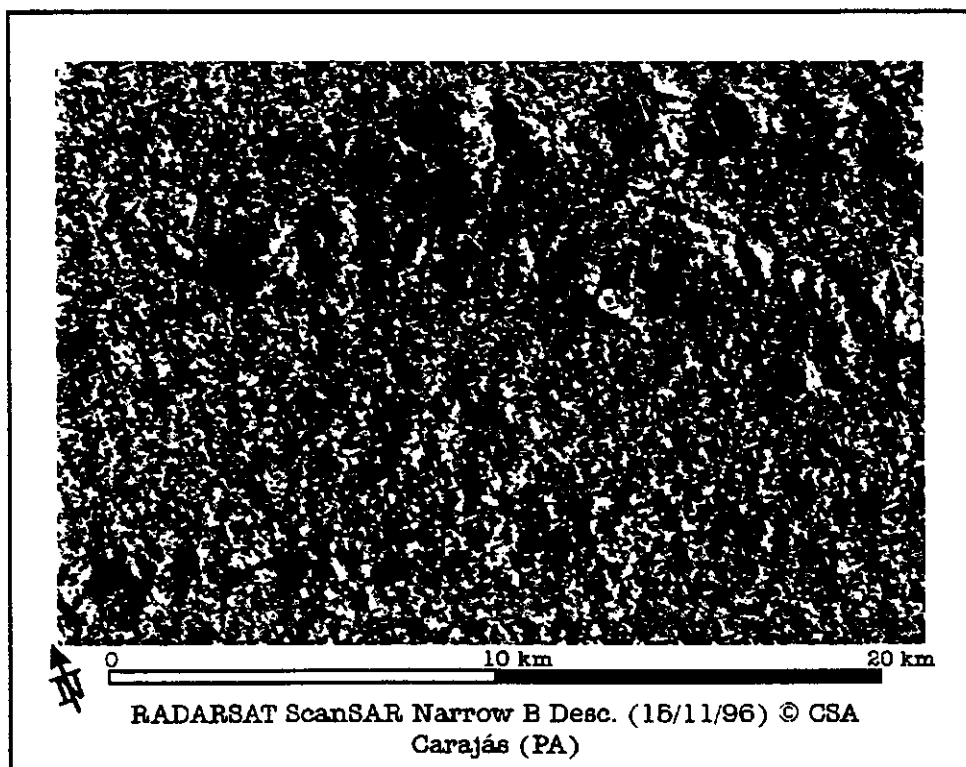
É fácil entender que a evolução das formas de relevo é controlada por fatores, tais como: clima e tectônica recente (morfogenéticos); pelas propriedades físico-químicas dos tipos litológicos (ruptibilidade, plasticidade, solubilidade e permeabilidade), que determinam a erodibilidade do maciço rochoso; ou ainda, as estruturas geológicas (foliações, fraturas, falhas e dobras), que condicionam a disposição dos canais de drenagem e das cristas.

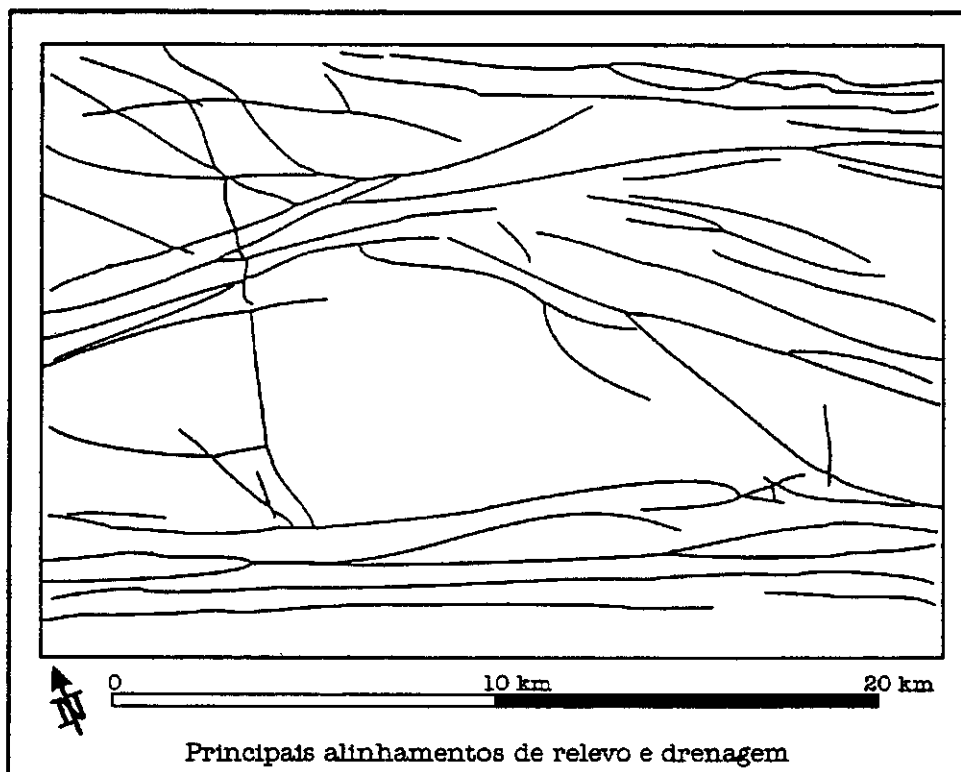
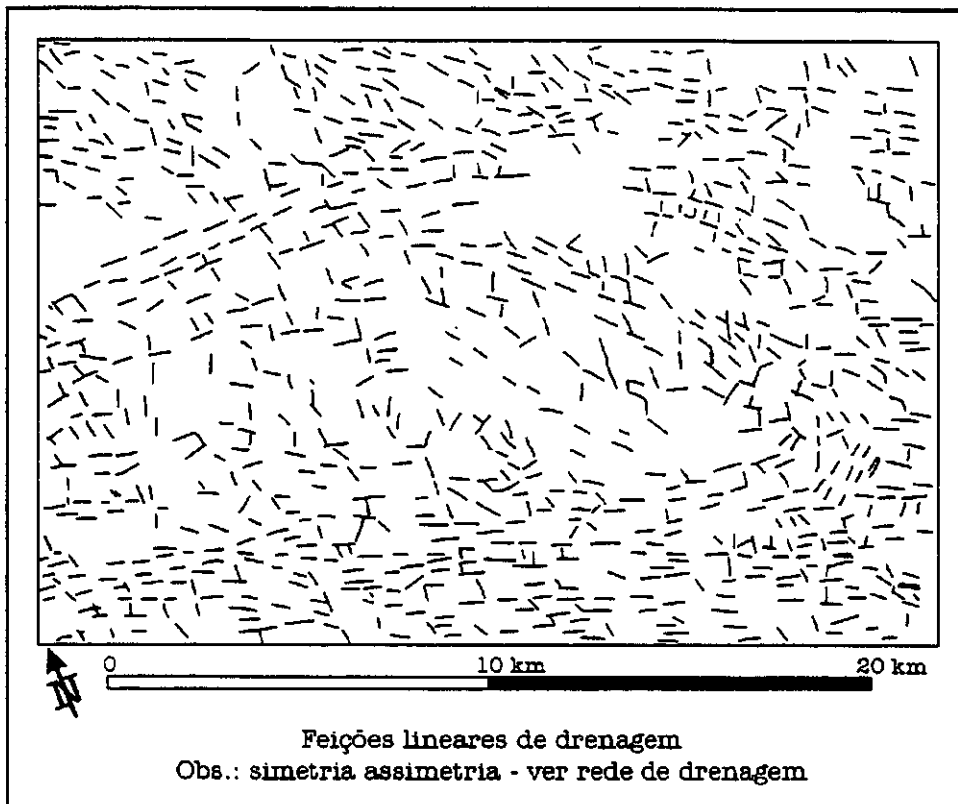
Cada uma das propriedades que caracterizam uma forma permite interpretações sobre o material superficial imageado, de forma que a sua somatória leve a caracterização de uma zona fotolitológica, que representa uma área cujas rochas apresentam propriedades comuns. As principais interpretações, de acordo com cada uma das propriedades das formas de drenagem e de relevo, serão discutidas resumidamente, à seguir.

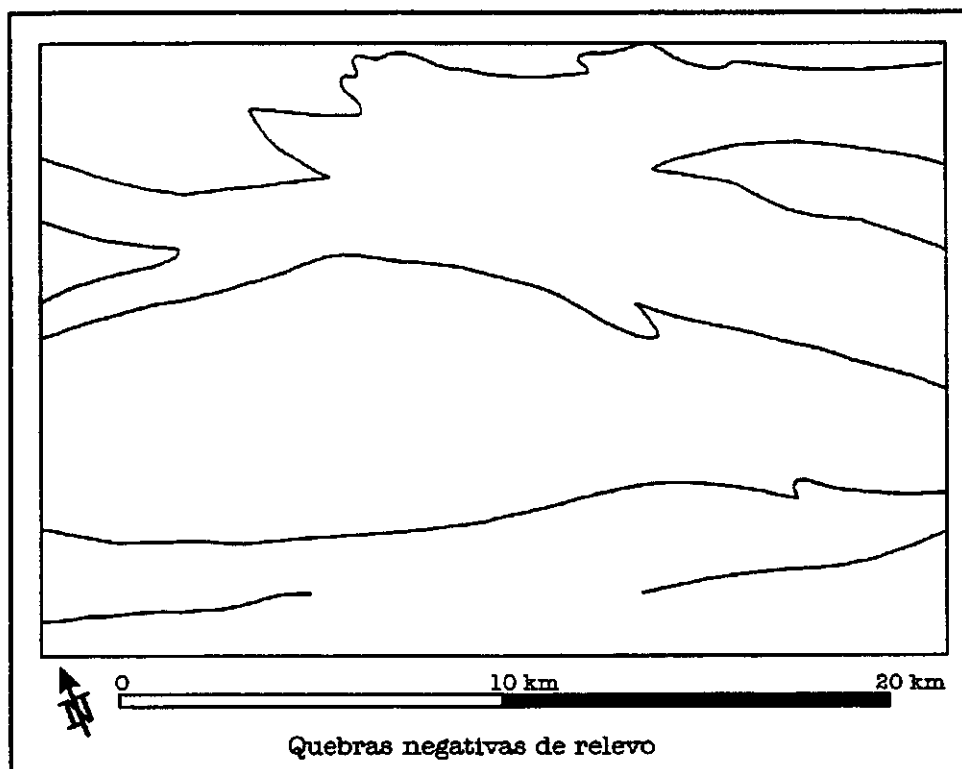
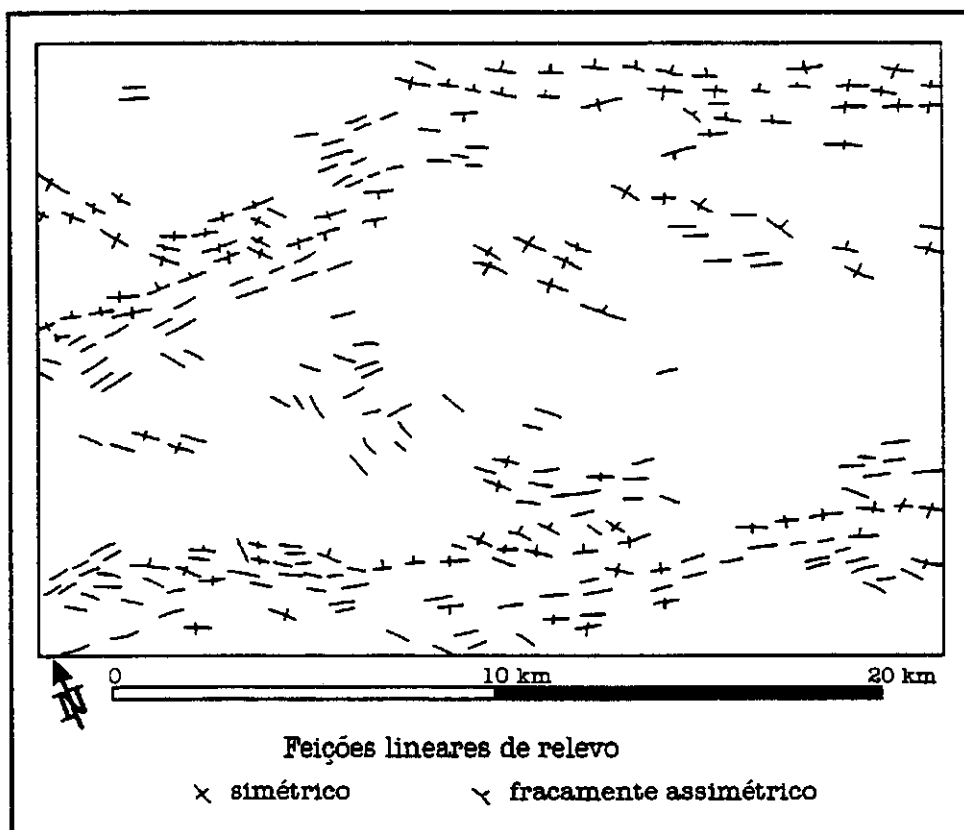
IA- Interpretação Geológica das Propriedades dos Elementos Texturais de Drenagem:

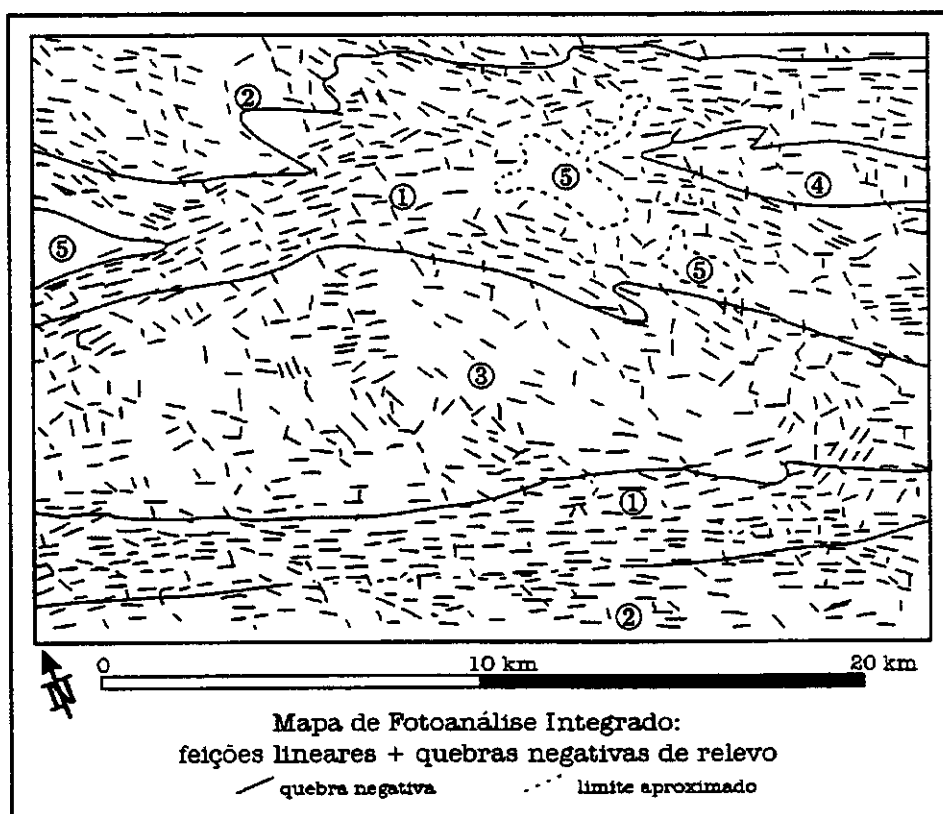
A frequência de drenagem, em uma área com mesmo índice pluviométrico, é inversamente proporcional a permeabilidade dos tipos litológicos superficiais. Essa propriedade permite a avaliação sobre a permeabilidade relativa das rochas das diferentes zonas fotolitológicas de uma determinada área.

A feição linear de drenagem representa a interseção de planos estruturais dos corpos rochosos, de origem tectônica (foliações e fraturas) ou não (acamamentos), com a superfície do terreno. É importante ressaltar que cada feição linear individualizada em uma imagem de radar representa, normalmente, a interseção com a superfície do terreno de uma série planos estruturais paralelos ou sub-paralelos (foliações, sistemas de fraturas ou acamamentos). As foliações (xistosidade, bandamento, foliação milonítico-cataclástica) são dadas pela disposição fortemente anisotrópica das feições lineares, constituindo trends estruturais bem definidos, normalmente paralelos ou sub paralelos ao plano de (as)simetria da drenagem (ver a propriedade assimetria de drenagem). Os sistemas de juntas também constituem trends estruturais, porém bi- a multi-direcionais e sem uma relação necessária de paralelismo com o plano de (as)simetria da drenagem. Comparar Mapa de Feições Lineares de Drenagem x Mapa Geológico, exemplificados na figura 1. Os acamamentos são definidos principalmente pelas assimetrias e feições lineares de relevo, como será discutido mais adiante. A feição linear de drenagem, no entanto, pode ser também uma feição diagnóstica do acamamento. No caso do acamamento, as feições lineares de drenagem também são fortemente anisotrópicas e paralelas a sub paralelas ao plano de (as)simetria da drenagem.









Propriedades dos Elementos Texturais					
Zonas Homólogas	ZH ₁	ZH ₂	ZH ₃	ZH ₄	ZH ₅
Frequência Textural	muito alta	Alta	moderada	baixa	nula
Alinhamentos	existem	Existem	existem	existem	não observados
Isotropia	—	—	—	—	—
Anisotropia	Unidirecional e Bidirecional preferenciais	Bidirecional Preferencial	Multidirecional	Unidirecional preferencial	—
Assimetria	fraca	não observada	não observada	fraca	—
Simetria	forte	Forte	não observada	não observada	—
Uniformidade	alta	Alta	baixa	moderada	Alta
Quebras negativas	1x2 parcial 1x3 1x4 1x5 parcial	2x1	3x1	4x1	5x1
Limites aproximados	1x2 parcial 1x5 parcial	2x1 parcial	—	—	5x1 parcial

Propriedades das Formas					
Zonas Homólogas	ZH ₁	ZH ₂	ZH ₃	ZH ₄	ZH ₅
Frequência Textural	Muito alta	Alta	moderada	baixa	Nula
Estrutura	bem definida	bem definida	mal definida	mal definida	—
Grau de Estruturação	Muito alto	Alto	baixo	baixo	—
Ordem de Estruturação	4	3	1	2	—

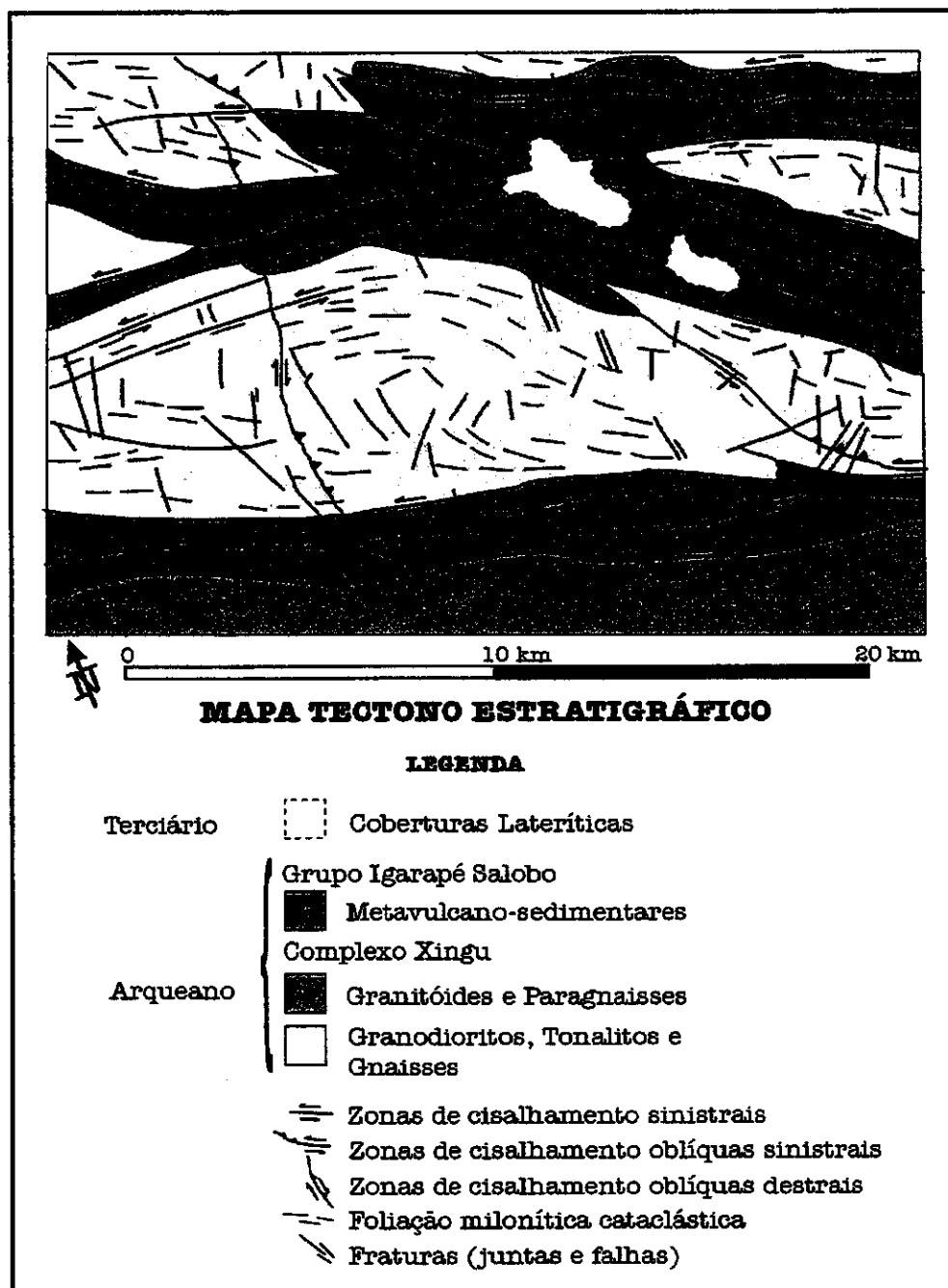


Figura 1: Exemplo esquemático das principais etapas da fotointerpretação geológica

O alinhamento de drenagem representa traços associados aos planos estruturais de maior magnitude dos corpos rochosos, ou seja, zonas de cisalhamento rúptil ou rúptil – dúctil ou dúctil e descontinuidades. A disposição e a forma do alinhamento de drenagem e a sua relação com as zonas homólogas adjacentes, são elementos indicativos do tipo de descontinuidade, considerando-se os três principais movimentos tectônicos (normal, direcional e inverso), ou uma combinação entre eles. Uma falha normal é representada na imagem por um alinhamento de drenagem, normalmente retilíneo em relevos planos, tornando-se ondulado quando a topografia é acidentada, devido ao alto ângulo de mergulho do plano estrutural. Em uma falha normal, o alinhamento comumente limita duas zonas homólogas não equivalentes, ou, uma mesma zona homóloga apresenta-se deslocada em ambos os lados do alinhamento. As estruturas com movimento direcional (falhas transcorrentes, zonas de cisalhamento) aparecem como alinhamentos de drenagem com traçado retilíneo ou sinuoso (lentes de cisalhamento). Os principais aspectos diagnósticos do sentido da movimentação direcional são as feições de arrasto (cisalhamento dúctil e rúptil - dúctil) e o deslocamento lateral de zonas homólogas equivalentes (cisalhamento rúptil), em ambos os lados do alinhamento. Em zonas de cisalhamento com movimento inverso ou oblíquo o alinhamento de drenagem é, normalmente, arqueado. Esse arqueamento é mais pronunciado nos empurrões do que nas estruturas inversas e oblíquas, por apresentarem menor ângulo de mergulho. Esse alinhamento normalmente limita zonas homólogas não equivalentes, e é comum que uma forte assimetria da drenagem indique o mergulho do plano estrutural e a movimentação do corpo rochoso, em direção à concavidade.

A tropia da drenagem fornece importantes informações sobre propriedades físicas das rochas. Uma drenagem com tropia predominantemente uni-direcional pode indicar o caráter fortemente anisotrópico do substrato rochoso. Passando por toda uma gama intermediária de variações, a drenagem com tropia predominantemente multi-direcional pode indicar o caráter isotrópico da litologia onde se instalou, ou uma superposição de eventos deformacionais.

A assimetria de drenagem nos dá informações sobre a atitude (direção e mergulho) dos planos estruturais (acamamento e foliação) das rochas. Ao se analisar uma assimetria de drenagem observa-se que o canal de ordem superior indica, aproximadamente, a direção do plano estrutural, enquanto que o sentido de seus afluentes mais longos (em relação aos da margem oposta) indica o mergulho. A magnitude do mergulho é inversamente proporcional ao grau de assimetria de drenagem, ou seja, quanto maiores forem as diferenças entre o tamanho e a forma dos canais de drenagem dos afluentes de uma margem em relação a outra, menor será o mergulho.

A homogeneidade de drenagem, que significa o nível de persistência das propriedades texturais comuns à uma zona homóloga, nos dá, também, indicações sobre a uniformidade das características litoestruturais de uma unidade fotolitológica.

1B- Interpretação Geológica das Propriedades das Formas de Drenagem:

A estrutura da drenagem é uma importante propriedade na interpretação geológica de uma imagem SAR, pois a lei que a define é o reflexo direto de um determinado condicionamento geológico/geomorfológico. Por exemplo, uma drenagem com estrutura radial pode estar associada a um alto estrutural, que é refletido na morfologia atual pelo condicionamento dos canais de drenagem em uma disposição radial.

Uma estrutura pode ser descrita pelo seu grau de estruturação, que define o nível de organização dos canais de drenagem. Esta propriedade dá maior (fortemente estruturado) ou menor (fracamente estruturado) consistência à lei que define a estrutura da drenagem e subsidia, na mesma proporção, à interpretação do controle geológico. No exemplo anterior, uma drenagem, com disposição radial fortemente estruturada, dá indicações mais confiáveis do que uma drenagem radial fracamente estruturada, na caracterização da lei que define a estrutura da drenagem e na interpretação geológica do alto estrutural.

A ordem de estruturação da drenagem descreve a complexidade de organização de seus canais, ou seja, a complexidade da lei ou das leis (no caso de superposição de diferentes controles) que definem a sua estrutura. Por exemplo, uma drenagem uni-direcional é de

baixa ordem de estruturação, pois o controle da disposição de seus canais pode ser descrita por uma lei de organização simples. Já, uma drenagem com estrutura radial tem uma ordem de estruturação maior, pois a sua lei de organização é mais complexa. De uma maneira geral, quanto maior a ordem de estruturação, mais evidente é o controle geológico na ordenação dos canais de drenagem. A complexidade de organização dos canais de drenagem, e portanto a ordem de estruturação, aumenta quando há a superposição de diferentes controles. Tomando os exemplos anteriores, a superposição de uma estrutura radial com um padrão unidirecional de drenagem elevará, ainda mais, a sua ordem de estruturação, e poderá ser interpretado como um alto estrutural resultante de uma flexura positiva, em uma área deformada por cisalhamento..

2A- Interpretação Geológica das Propriedades dos Elementos Texturais de Relevo:

A freqüência de elementos texturais de relevo fornece indicações sobre o grau de dissecação do terreno analisado. A freqüência de elementos texturais está diretamente relacionada a intensidade de atuação da dissecação no desenvolvimento atual do relevo, ou seja, o aumento da freqüência indicará o predomínio progressivo dos processos erosivos (que estão diretamente ligados com a resistência dos maciços rochosos) sobre os deposicionais. Numa região submetida às mesmas condições de evolução geomorfológica, áreas com diferentes freqüência texturais de relevo representam conjuntos rochosos com diferentes níveis de resistência à erosão (diferentes propriedades físico-químicas) e, portanto, diferentes tipos litológicos e/ou estruturas geológicas. Convém lembrar que no radar esta análise é sempre comparativa e relativa, pois o número absoluto dos elementos texturais de relevo, de uma determinada área, pode variar muito de acordo com o ângulo de incidência utilizado, que irá determinar a maior ou menor atuação da micro-topografia no retroespalhamento do sinal de radar.

As feições lineares de relevo, apesar de não serem tão diagnósticas quanto as de drenagem, são, também, indicativas de interseção de planos de foliações, fraturas e acamamentos. As feições lineares de relevo posicionam-se paralelamente à direção dessas estruturas planares, e o critério de identificação do tipo de estrutura é o mesmo descrito para as feições lineares de drenagem.

Os alinhamentos de relevo são, juntamente com os alinhamentos de drenagem, os principais indicadores das estruturas planares de maior grandeza: zonas de cisalhamento dúcteis, rúpteis - dúcteis e dúcteis e descontinuidades. Os critérios de identificação desses tipos de estruturas estão descritos no item alinhamentos de drenagem.

As quebras positivas de relevo são as formas salientes do relevo (cristas), lineares e fortemente estruturados, e são importantes elementos na caracterização da assimetria do relevo (pela avaliação das declividades de suas encostas).

As quebras negativas de relevo são as mais importantes feições indicativas do limite entre diferentes maciços rochosos. As quebras negativas constituem limites definidos entre zonas fotolitológicas (zonas homólogas de relevo).

A assimetria de relevo, assim como a de drenagem, fornece importantes informações sobre a atitude (direção e mergulho) de acamamentos e, subordinadamente, de foliações das rochas. A disposição das cristas (quebras positivas) indica, aproximadamente, a direção do plano estrutural. A encosta de menor declividade indica, por sua vez, o sentido do mergulho, a 90° da direção. Quanto maior for a diferença entre as declividades das encostas, em ambos os lados da crista, mais assimétrico será o relevo e menor será o ângulo de mergulho do plano estrutural. Relevos simétricos indicam mergulhos sub-verticais, e relevos fortemente assimétricos indicam mergulhos sub-horizontais. A análise da assimetria de relevo, em uma imagem de radar, deve considerar, necessariamente, os efeitos de deslocamento de relevo (principalmente layover) que podem, em situações mais severas, modificar as assimetrias de relevo de tal forma que inviabilize esse tipo de análise. Regiões com relevos montanhosos e imagens de radar com pequenos ângulos de incidência agravam esse tipo de problema, principalmente na porção *near* da cena.

A forma das vertentes está diretamente relacionada a resistência à erosão (intemperismo físico e químico) dos maciços rochosos. Vertentes predominantemente convexas indicam rochas pouco resistentes à erosão, onde a velocidade do intemperismo é maior do que a

velocidade de remoção do material desagregado. Por outro lado, vertentes predominantemente côncavas indicam rochas muito resistentes à erosão, onde a velocidade do intemperismo é menor do que a velocidade de remoção do material desagregado.

A homogeneidade das propriedades texturais de relevo (assim como as de drenagem) é diretamente relacionada ao grau de persistência das propriedades físico-químicas dos tipos litológicos, em uma determinada zona homóloga.

2B- Interpretação Geológica das Propriedades das Formas de Relevo:

A estrutura, o grau de estruturação e a ordem de estruturação do relevo têm papéis semelhantes aos descritos para a drenagem. Exemplificando: cristas assimétricas e paralelas, com estrutura unidirecional, podem ser interpretadas como uma sequência de estratos rochosos, com mergulhos em um mesmo sentido, constituídos por diferentes tipos litológicos, separados por quebras negativas. Se o padrão unidirecional das cristas é fortemente estruturado (grau de estruturação), a lei de ordenação dos elementos texturais é bem definida, assim como a estruturação geológica dos estratos em um monoclinal. Neste caso, a ordem de estruturação é baixa, quando comparada, por exemplo, com uma disposição radial dos elementos texturais de relevo, porque a lei de ordenação dos elementos texturais de relevo é mais simples.

II - Interpretação das Variações de Tonalidade de Cinza (cenas de radar) ou de Matiz (produtos integrados)

As variações de tonalidade de cinza, em uma imagem de radar, dependem de uma série de fatores relacionados às características do sistema imageador e às propriedades do alvo. Com relação ao sistema de radar, a intensidade do retroespalhamento depende, basicamente, do ângulo de incidência, do comprimento de onda (banda das microondas), e da polarização utilizados. Com relação ao alvo, o sinal de retorno de radar é influenciado, principalmente, pela geometria superficial e pelas propriedades dielétricas dos materiais na superfície do terreno.

Os modernos sensores SAR atuam praticamente em todas as bandas das microondas e permitem uma ampla variação dos ângulos de incidência e de polarizações, o que torna impraticável qualquer generalização quanto ao comportamento da tonalidade de cinza, com relação a essas variáveis. Já, em relação aos alvos, a geometria dos objetos superficiais (macro + meso-rugosidades) é a responsável pela textura de uma imagem de radar, ou seja, as formas dos objetos imageados são responsáveis pelas diferentes intensidades de retroespalhamento do sinal de radar, que resultarão nas nuances de tons de cinza, responsáveis pela sensação de relevo. As características do alvo, portanto, de interesse prático na interpretação geológica das tonalidades de cinza, são as propriedades dielétricas dos materiais superficiais e a micro-rugosidade superficial, que é associada ao tom de radar (Lewis *et al.* 1998), mas, no entanto, é dependente do comprimento de onda do sistema SAR.

De maneira geral, bons condutores elétricos, tais como materiais metálicos, retroespalham mais fortemente o sinal de radar. Um aspecto importante para a interpretação geológica, relaciona-se à proporcionalidade existente entre a intensidade do sinal de retorno do radar e a umidade superficial, desde que não haja lâmina d'água. Os materiais naturais superficiais úmidos são condutores moderados de eletricidade, enquanto que os secos são maus condutores. As águas superficiais em tons negros (reflexão especular), as atividades antrópicas com sua típica disposição geométrica e, geralmente, em tons mais escuros em relação à sua vizinhança (desmatamento), são, também, exemplos de elementos de paisagem identificados pela tonalidade de radar.

Em um produto multifonte, as variações de matiz representam o conjunto de dados adicionais aos de radar, que constituem a textura (morfologia) do produto fotográfico. As variações de matiz representam uma escala de grandeza, ajustada ao intervalo de valores do conjunto de dados utilizados na integração com o radar. Normalmente, o intervalo de valores do conjunto de dados é ajustado à porção visível do espectro eletromagnético, de forma que os menores valores sejam associados à cor azul e os maiores à cor vermelha. Naturalmente, a interpretação dessas variações de matiz requer o entendimento sobre as características do conjunto de dados, e o seu significado dentro do contexto de avaliação

geológica de uma determinada área. Exemplificando, a utilização de dados gamaespectrométricos, em um produto multifonte, pode fornecer indicações importantes sobre as variações composicionais dos tipos rochosos. Assim, dados gama contagem total têm a sua melhor aplicação na discriminação de grupos litológicos. Os dados gama U e Th, por outro lado, são importantes na detecção de processos metassomáticos/hidrotermais, devido a diferença de mobilidade geoquímica entre esses dois elementos, nos processos secundários (Paradella *et al.* 1998). Já, no caso da utilização dos dados TM-Landsat, as variações de matiz representarão um mapeamento das respostas espectrais dos materiais superficiais (vegetação, solo, etc.) da área analisada.

III - Modelo Fotointerpretativo

O resultado final da análise e da interpretação dos elementos de uma imagem de radar, é a definição de um modelo fotointerpretativo para a área estudada. Neste modelo fotointerpretativo é cartografado o conjunto de interpretações realizadas sobre os dados SAR, levando à definição das principais unidades fotolitológicas e seu empilhamento estratigráfico relativo, das estruturas geológicas, de aspectos evolutivos, etc. Estas interpretações são filtradas e adicionadas ao atual conhecimento existente sobre a área, chegando-se, finalmente, a um Mapa Fotogeológico.

REFERÊNCIAS

CCRS 1999. Cover Page (<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>).

D'Iorio M.A., Budkewitsch P., Mahamood N.N. 1997. Practical considerations for geological investigations using RADARSAT-1 stereo image pairs in tropical environments. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.

EnviSAT-1 1999. Home Page (<http://envisat.estec.esa.nl/>).

ESA 1999. Home Page (<http://www.esa.int/>).

Guy M. 1966. Quelques principes et quelques expériences sur la methodologie de la photo-interpretation. In:

- Symposium International de Photo-Interpretation, 2, Paris. *Acte*, 1:21-41.
- Harris J., Bowie C., Rencz A., Graham D. 1994. Computer-enhancement technique for the integration of remotely sensed, geophysical, and thematic data for the geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20: 210-221.
- Kobrick M., Leberl F.W., Raggan J. 1986. Radar stereo mapping with crossing flight lines. *Canadian J. Remote Sensing*, 12 (9): 132-148.
- Lewis A.J., Henderson F.M., Holcomb D.W. (Contributing Author) 1998. Radar fundamentals: The Geoscience Perspective. In: F.M. Henderson & A.J. Lewis (eds.) *Principles & Applications of image Radar, Manual of Remote Sensing*. New York, Am. Soc. Phot and Rem Sens., 131-181..
- Lima M.I.C. 1989. Metodologia de interpretação radargeológica. In: SELPER, Simposio Latinoamericano de Percepción Remota, 4, San Carlo de Bariloche, *Memorias*, 629-639.
- Lima M.I.C. 1995. *Metodologia de interpretação radargeológica: exemplo da Sinéclise do Parnaíba e de seu embasamento*. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Tese de Doutorado, 280p.
- Lueder D.R. 1959. *Aerial photographic interpretation: Principles and applications*. New York, McGraw-Hill, 615.
- Miller V.C. & Miller C.F. 1961. *Photogeology*. New York, McGraw-Hill, 248p.
- NASA 1999. Home Page (www.nasa.gov).
- NASDA 1999. Home Page (http://www.nasda.go.jp/index_e.html).
- Paradella W.R., Bignelli P.A., Veneziani P., Pietsch R.W., Toutin T. 1997. Airborne and spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) integration with Landsat TM and Gamma Ray Spectrometry for geological mapping in a Tropical Rainforest environment, the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 18(7): 1483-1501.
- Paradella W.R., Santos A.R., Dall'Agnol R., Pietsch R.W., Sant'Anna M.V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite Area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24(7): 376-392.

- Paradella W.R., Santos A.R., Veneziani P., Sant'Anna M.V., Morais M.C. de 1999. Geological investigation using RADARSAT-1 images in the tropical rain forest environment of Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing* (in press).
- RADARSAT 1999. RADARSAT web site (<http://radarsat.space.gc.ca/>).
- RADARSAT International 1995. *RADARSAT Illuminated – Your Guide to Products & Services*. British Columbia, Canada, RADARSAT International, 1-1 – 4-7p.
- Ricci M. & Petri S. 1965. *Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica*. São Paulo, Companhia Editora Nacional, 226p.
- Rivereau J.C. 1970. Notas de aula do Curso de Fotointerpretação. In: Soc. Intern. Cult. Esc. Geol., Semana de Estudos, 11, Ouro Preto, 128p.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Liu C.C., Sant'Anna M.V. 1997. Integração de dados SAR-TM e SAR-GAMA em estudos geológicos na Província Mineral de Carajás (Brasil). In: SELPER, Simposio Latinoamericano de Percepcion Remota, 8, Mérida, Venezuela, *CD-ROM*.
- Santos A.R., Paradella W.R., Veneziani P., Morais M.C. de 1999. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências* (in press).
- Soares P.C. & Fiori A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*, 16(32):71-104.
- Toutin T. 1995. Intégration de données multi-source: comparaison de méthodes géométriques e radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, 16: 2795-2811.
- Toutin T. 1996. Opposite side ERS-1 SAR stereo mapping over rolling topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2): 543-549.
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: ADRO, Final Symposium. Montreal, Canada, *ADRO 453*.
- Toutin T. & Vester, C. 1997. Understanding RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.

Veneziani P. & Anjos C.E. 1982. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicações em geologia*. São José dos Campos, INPE, 54p. (INPE-2227-MD/14).

Vergara L.M.L. 1971. *Manual de Fotogeologia*. Madri. Servicio de Publicaciones de La J.E.N., 286p.

Wakabayashi H., Ito N., Hamazaki T. 1998. PALSAR System on the ALOS. In: European Symposium on Remote Sensing, Barcelona, Espanha. *ALOS Home Page* (<http://eos-p71b.hq.nasda.go.jp/alos.html>).

CAPÍTULO II

PROVÍNCIA MINERAL DE CARAJÁS

INTRODUÇÃO A Província Mineral de Carajás é uma das mais importantes reservas minerais do Brasil com depósitos de Fe (os maiores do mundo), Au, Cu, Mn e Ni. Apesar de existirem vários trabalhos de cunho estratigráfico (p. ex.: Hirata *et al.* 1982, Meireles *et al.* 1984, DOCEGEO 1988) e tectônico (p. ex.: Cordani & Brito Neves 1982, Hasui & Haraly 1985, Araújo *et al.* 1988, 1992, Siqueira & Costa 1991, Macambira *et al.* 1994, Costa *et al.* 1994, Pinheiro 1997) existem ainda problemas que dificultam o entendimento da geologia da região. Estes problemas, que se refletem diretamente na prospecção mineral, relacionam-se aos seguintes fatores, como enfatizou Pinheiro (1997):

- 1- Mais de 80% das rochas da região possuem escassos e esparsos afloramentos, com o agravante de estarem cobertos pela densa floresta tropical;
- 2- A intensa deformação destruiu o correlacionamento estratigráfico primário dessas rochas;
- 3- Os mapeamentos de detalhe são baseados essencialmente nos aspectos litológicos, localizados nas áreas mineralizadas (distantes entre si) o que acarretou na criação de um conjunto complexo de diferentes nomenclaturas estratigráficas.

Tendo em vista tais fatores, que evidenciam a necessidade de utilização de métodos alternativos para a investigação geológica da região amazônica, no final da década de 80, início dos anos 90, foi iniciado um projeto com a utilização intensiva de produtos de sensoriamento remoto ópticos e de radar, bem como os resultados das integrações destes com dados geofísicos. Embora as imagens de sensoriamento remoto já haviam sido empregadas (p. ex.: Projeto RADAMBRASIL), avanços tecnológicos, tanto do ponto de vista dos sistemas sensores bem como dos processamento e tratamento digitais e métodos interpretativos (p. ex.: Santos *et al.* 1997, Paradella *et al.* 1998) incrementaram as possibilidades de obtenção de melhores e mais detalhadas informações geológicas.

Um dos primeiros resultados do projeto referenciado, segundo o plano geológico-estrutural-tectônico, foi apresentado por Veneziani *et al.* (1995). Estes autores reconheceram indicadores cinemáticos nos produtos de sensoriamento remoto que implicavam em uma movimentação sinistral ao longo da direção WNW-ESSE, na região da Serra dos Carajás e identificaram as estruturas secundárias associadas (empurrões, sintéticas, antitéticas e tracionais), tanto de natureza dúctil como rúptil. Os dados interpretativos foram confirmados em campanha de campo. A continuidade dos estudos permitiu a aquisição de um volume considerável de dados que propiciou a Veneziani *et al.* (2000) a elaboração de um modelo de evolução tectônica regional para a Província Mineral de Carajás.

CONTEXTO GEOLÓGICO Apresenta-se a seguir, de modo bastante simplificado, os principais trabalhos de cunho regional que abordaram a geologia da região da Província Mineral de Carajás. Para melhor entendimento da nomenclatura utilizada ver quadro da tabela 1.

Cordani & Brito Neves (1982) e Teixeira *et al.* (1989) caracterizaram a região da província baseados em modelo de cinturões móveis proterozóicos ao redor de um craton arqueano. Os granulitos e migmatitos, que ocorrem a norte da Serra de Carajás, seriam representantes do Cinturão Maroni-Itacaiúnas e os gnaisses e metavulcano – sedimentares que constituem a estrutura dessa serra, foram correlacionados à Província Amazônia Central do Eo Proterozóico/Arqueano.

DOCEGEO (1988) subdividiu a província mineral em três unidades: 1- Complexo Xingu, com gnaisses tonalíticos e granodioríticos e rochas meta - supracrustais; 2- Supergrupo Itacaiúnas, englobando todas as rochas metavulcano-sedimentares (grupos Igarapé Salobo, Igarapé Pojuca e Grão-Pará) e “metarenitos” (Grupo Rio Fresco-Formação Águas Claras, de Araújo & Maia 1991) e; 3- granitos intrusivos proterozóicos.

Araújo & Maia (1991) e Oliveira *et al.* (1994) consideraram a região em apreço como parte do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas e distinguiram três domínios regionais: 1-

Meridional, caracterizado por zonas de cisalhamento imbricadas que deformaram as rochas dos complexos Xingu, Pium e da Suite Plaquê e Grupo Sapucaia; 2- Central, afetado por transcorrências do Sistema Carajás (flor positiva) e por mecanismos “strike slip” dos sistemas Cinzento, Tapirapé e Buritirama e; 3- Setentrional, onde rochas granulíticas encontram-se tectonicamente imbricadas com rochas do Complexo Xingu e, subordinadamente, com metassedimentos Baseados em datações geocronológicas consideraram toda a seqüência de idade arqueana, com exceção dos granitos anorogênicos (eo proterozóicos) e coberturas sedimentares da Serra do Paredão e respectivas intrusivas básicas.

Pinheiro (1997) subdividiu tectono–estratigraficamente as regiões dos sistemas de cisalhamento Carajás (domínio da serra) e Cinzento (a norte) baseado nas “relações geológicas das unidades com as principais fases de movimentos dúcteis ao longo da Zona de Cisalhamento Itacaiúnas”. Subdividiu a área estudada da seguinte maneira: 1- Assembléia embasamental, composta por ortognaisses e plutons granitóides (Complexo Xingu) e por seqüências metavulcano–sedimentares, quartzitos, xistos, anfibolitos e formações feríferas (Grupo Igarapé Salobo). Tais rochas mostram-se intensamente deformadas (cisalhamento dúctil) e metamorfasadas em alto grau, de forma que o relacionamento entre elas encontra-se obliterado; 2- Assembléia de cobertura, composta por vulcano–sedimentares de baixo grau metamórfico, também deformadas pelos movimentos ao longo do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas (grupos Igarapé Pojuca e Grão–Pará) recobertas por depósitos clásticos (Formação Águas Claras). Tanto as assembléias de cobertura e embasamental foram intrudidas por plutons graníticos e diques básicos e apresentam coberturas conglomeráticas (Formação Gorotire ?) localizadamente.

Foram publicados importantes modelos de cunho regional relacionados com a evolução tectono–estratigráfica da região da Província Mineral de Carajás. Os mais abrangentes são os de Araújo & Maia (1991), Oliveira *et al.* (1994), Costa *et al.* (1995) e Pinheiro (1997). Embora existam algumas divergências entre esses autores, do ponto de vista global, as propostas são bastante semelhantes.

Tabela 1: Unidades Tectono-Estratigráficas da Província Mineral de Carajás

Idade	Unidades Tectono-Estratigráficas (modificado de Pinheiro 1997)	Metamorfismo	Deformação
?	<u>Rochas intrusivas básicas</u> : diabásios (Oliveira <i>et al.</i> 1994)	Não metamórfico	Rúptil
Siluro-Ordoviciano(?)	<u>Grupo Serra do Paredão</u> : ortoquartzitos e conglomerados polimictos (Figueiras <i>et al.</i> 1987); <u>Grupo Serra Grande</u> (Pinheiro 1997)		
Meso a Neo Proterozóico	<u>Formação Gorotire</u> : arcósios, arenitos e conglomerados polimictos (Hirata <i>et al.</i> 1982, Pinheiro 1997)		
Eo Proterozóico	<u>Granitos Anorogênicos</u> (Dall'Agnol <i>et al.</i> 1986, Macambira <i>et al.</i> 1992, Pinheiro 1997)		
Arqueano a Eo Proterozóico	<u>Formação Aguas Claras</u> : pelitos, siltitos e arenitos (Araújo <i>et al.</i> 1988, Nogueira 1995)		
Arqueano	<u>Complexo Granítico Estrela</u> : granitos sintectônicos com diferentes composições (Barros & Dall'Agnol 1994) <u>SUPERGRUPO ITACAIUNAS</u> (DOCEGEO 1988) • <u>Grupo Buritirama</u> : quartzitos e micaxistos • <u>Grupo Grão-Pará</u> : <u>Formação Carajás</u> : formações feríferas, corpos de hematita e jaspilitos; <u>Formação Parauapebas</u> : metavulcânicas, intrusões máficas e félsicas, "Gabro Santa Ines"	Xisto-verde muito baixo	Dúctil-rúptil
	• <u>Grupo Igarapé Pojuca</u> : metavulcano-sedimentares, formações feríferas, rochas gnáissicas	Xisto-verde muito baixo	Dúctil
	• <u>Grupo Igarapé Salobo</u> : metavulcano-sedimentares, formações feríferas e xistos	Xisto-verde baixo	Dúctil
	<u>Grupo Sapucaia</u> : metavulcano-sedimentares com predomínio de metamáficas e metaultramáficas (Araújo <i>et al.</i> 1988)		
	<u>COMPLEXO GRANÍTICO-GNAÍSSICO</u> (Silva <i>et al.</i> 1974, DOCEGEO 1988, Araújo <i>et al.</i> 1988, Araújo & Maia 1991, Oliveira <i>et al.</i> 1994) <u>Suite Plaquê</u> : granitos sintectônicos <u>Complexo Xingu Indiferenciado</u> : gnaisses tonalíticos, trondjemíticos, granitos, granodioritos e anfibolitos Neste trabalho: <u>Xingu A</u> : paragnaisses e granitóides; <u>Xingu B</u> : gnaisses, metabásicas e xistos máficos; <u>Xingu C</u> : granodioritos, tonalitos e gnaisses <u>Complexo Pium e Suite Monte Bacajá</u> : granulitos, charnockitos, enderbitos e kinzigitos	Anfibolito a Granulito	Dúctil

De um modo geral os principais pontos convergentes são: 1- a região está inserida no Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas orientado segundo WNW-ESSE; 2- um cisalhamento,

de natureza dúctil, afetou as rochas infracrustais (complexos Pium e Xingu e a Suite Bacajaí) e parte das coberturas representadas pelo Supergrupo Itacaiúnas (tabela 1). Está associado à um conjunto de movimentos sinistrais oblíquos (empurrões imbricados) associados à transcorrentes (“strike slip systems”) regionais; 3- o desenvolvimento desta movimentação ocorreu no Arqueano; 4- foi reconhecido um episódio de natureza destal transtensivo (ao longo de WNW-ESSE) que deu origem a uma série de bacias e; 5- a partir do Eo Proterozóico passaram a predominar movimentos distensivos, responsabilizados pela alocação dos granitos anorogênicos e das intrusões básicas.

Produtos de sensoriamento remoto tem sido utilizados, desde o início da década de 90, para a obtenção de dados indiretos à respeito dos movimentos tectônicos que se desenvolveram em parte do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, especificamente na região da Província Mineral de Carajás. Veneziani *et al.* (2000) propuseram um modelo de evolução tectono-estratigráfica para a região, baseado na interpretação de imagens TM Landsat (bandas 4 e 5), SAR RADARSAT (modos ScanSAR Narrow descendente e Standard S5 e S7 descendentes e S5 e S6 ascendentes), além de cenas parciais integradas TM – gamaespectrométricas e SAR - gamaespectrométricas, todas na escala de 1 : 250.000 (tabela 2). Os dados obtidos foram complementados com os de trabalhos preexistentes (mapeamentos e pontos de campo) e também verificados em perfis previamente selecionados pelos autores. Indicadores cinemáticos obtidos a partir das interpretações e observados em afloramentos indicaram que: 1- o Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, orientado segundo a direção geral WNW-ESE, sofreu inicialmente uma movimentação sinistral (ao longo dessa direção) com o desenvolvimento de estruturas associadas (empurrões, sintéticas., antitéticas, dobramentos, estiramentos, geração de foliações

Tabela 2: Principais características dos dados de sensoriamento remoto utilizados

Satélite	Imagem	Banda/ Posição*	Escala	Data	Resolução Espacial (m)	Elev. solar/ Incidência	Az. Solar/ Az. de Iluminação
L A N D S A T	TM WRS 226/064	4	1: 250.000	22/06/86	30	43°	50°
		5	1:250.000	22/06/86	30	43°	50°
R A D A R S A T	SAR-C Standard	S5D	1: 250.000	31/05/96	24,2x27	36/42°	282°
		S5A	1: 250.000	28/08/97	24,2x27	36/42°	78°
		S6A	1: 250.000	28/11/96	22,1x27	41/46°	78°
		S7D	1:250.000	11/09/96	22.09x27	45/48°	282°
	SAR-C ScanSAR Narrow	SN2D	1: 250.000	15/11/96	55,1x71,1	31/46°	282°

*A= órbita ascendente, D= órbita descendente

miloníticas, etc.), representantes de um fluxo de massa rochosa de NE para SW ($\sigma 1$ NE-SW); 2-seguiu-se uma movimentação destal (fluxo de NW para SE) reativando as direções preexistentes porem com o sentido de movimentação compatível com a orientação de $\sigma 1$ NW-SE, que está registrada por deformações dúcteis e frágeis - dúcteis, tanto nas rochas embasamentais quanto nas coberturas metavulcano-sedimentares; 3- finalmente, registros de movimentos sinistrais ao longo da direção WNW-ESSE, que geraram deformações rúpteis-dúcteis e rúpteis, foram observados, mostrando que o fluxo de massa rochosa voltou a ser NE-SW. As deformações desta fase afetaram toda a seqüência rochosa da região, inclusive as coberturas e granitos anorogênicos, sendo que nestes últimos conjuntos as deformações são exclusivamente rúpteis. Tais fases de deformações transpressivas (com registros transtensivos localizados) encerraram-se no final do Arqueano, segundo as datações disponíveis até o presente. A partir desse período passaram a predominar movimentos distensivos que reativaram as antigas e preexistentes linhas de fraqueza

crustal. O conjunto dessas evidências analisado à luz dos dados litológicos, de metamorfismo e das datações geocronológicas, permitiram a elaboração de um modelo de evolução tectono-estratigráfica para a região.

REFERÊNCIAS

- Araújo O. J. B. de & Maia R. G. N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. Relatório Final. CPRM, Rio de Janeiro, Brasil, 136p.
- Araújo O.J.B. de, Maia R.G.N., Jorge João X da S., Costa J.B.S. 1988. A megaestruturação arqueana da Folha Serra dos Carajás. In: Congresso Latino-Americano de Geologia, 7, Belém, Anais, 1: 334-338.
- Araújo O.J.B. de, Costa J.B.S., Pinheiro R.V.L., Maia R.G.N.M., Macambira E.M.B., Vale A.G., Siqueira, J.B., Jorge João, X. da S. 1992. Arcabouço estrutural do complexo de bacias transcorrentes arqueanas da região de Serra dos
- Barros C.E.M. & Dall'Agnol, R. 1994. Deformação de rochas granitóides em regime dúctil: o exemplo do Gnaiss Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, Resumos Expandidos, 1: 547-548.
- Estrela, região de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(3): 129-138.
- Cordani U. G. & Brito Neves B. B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, 12: 78-88.
- Costa J.B.S., Araújo O.J.B. de, Jorge João X. da S., Maia R.G.N.N., Macambira E.M.B., Vale A.G., Santos A. dos, Pena Filho J.I. de C. e Neves, A.P. 1994. Panorama tectono-estrutural da região sudeste do Estado do Pará. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 4, Belém, Resumos Expandidos, 314-317.
- Costa J.B.S., Araújo O.J.B. de, Santos A. dos, Jorge João, X. da S., Macambira M.J.B., Lafon J.M. 1995. A Província Mineral de Carajás: aspectos tectono-estruturais, estratigráficos e geocronológicos. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7: 199-235.
- Dall'Agnol R., Viera E.A. de P., Sá C.E.S., Medeiros H. de, Gastal M. do C.P., Teixeira N.P. 1986. Estado atual do conhecimento sobre as rochas granitóides da porção sul da Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geociências*, 16(1): 11-23.
- Figueiras A.J.M., Macambira J.B., Villas R.N.N. 1987. Contribuição ao estudo paleoambiental da Formação Rio Fresco

na região de Carajás – PA. In: Simpósio sobre Sistemas Depositionais no Pré-Cambriano, Ouro Preto, Anais, 17-30.

DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, Belém, *Anexo*, 10-54.

Hasui Y. & Haraly N. L. E. 1985. Integração de informações geofísicas e geológicas na definição de estruturas crustais brasileiras. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4: 248-249.

Hirata W.K., Rigon J.C., Cordeiro A.A.C., Meireles E. de M. 1982. Geologia regional da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, 100-108.

Macambira E.M.B., Jorge João X. da S., Lafon J.M., Pereira E.D. 1992. Aspectos geológicos e geomorfológicos do Granito Paruári no domínio da Folha São Félix do Xingu (SB.22-Y-B) – Sul do Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo, Anais, 1, 171-173.

Macambira E.M.B., Vale A.G., Jorge João X. da S., Costa J.B.S. 1994. O quadro geológico da Folha São Félix do Xingu (SB.22-Y-B), SE do Estado do Pará. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 38, Balneário de Camboriú, Resumos Expandidos, 2, 111-112.

Meireles E. de M., Teixeira J.T., Medeiros Filho C.A. 1982. Geologia preliminar do depósito de ouro de Serra Pelada. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Belém, Anais, 2, 74-83.

Nogueira A.C.R. 1995. *Análise faciológica e aspectos estruturais da Formação Águas Claras, região central da Serra dos Carajás – Pará*. Universidade Federal do Pará, Belém, Dissertação de Mestrado, 167p.

Oliveira J. R. de, Silva Neto C. S., Costa E. J. de S. 1994. *Serra Pelada, Folha SB-22-X-C*. Relatório Final. Rio de Janeiro, CPRM, 220 p.

Paradella W. R., Santos A. R., Dall'Agnol R., Pietsch R. W., Sant'Anna M. V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 24 (4): 376-392.

Pinheiro R. V. L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil*. University of Durham, UK, Ph.D Dissertation, 408 p.

Santos A. R., Paradella W. R., Veneziani P., Liu C. C., Sant'Anna M. V. 1997. Integração de dados SAR-TM e SAR-GAMA em estudos geológicos na Província Mineral de Carajás (Brasil). In: SELPER, Simposio

Latinoamericano de Percepcion Remota. 8, Mérida, Venezuela, *CD-ROM*.

Siqueira J.B. & Costa J.B.S. 1991. O Duplex Salobo-Mirim, Serra dos Carajás. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, 3. Rio Claro, Boletim, 47-48.

Teixeira W., Tassinari C. C. G., Cordani U. G., Kawashita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, 42: 213-217.

Veneziani P., Santos A.R., Paradella W.R., Liu C.C., Bignelli P.A. 1995. Reconhecimento de zonas de cisalhamento transcorrente (zcts) na região da Serra dos Carajás (PA), em produtos de sensoriamento remoto. In: Simpósio Nacional de Estruturas Tectônicas, 5, Gramado, Resumos Expandidos.

Veneziani P., Paradella W.R., Santos, A.R., Moraes M.C. 2000. A evolução tectono-estratigráfica da Província Mineral de Carajás: uma interpretação através de dados de sensoriamento remoto óptico (TM-Landsat) e das microondas (SAR C-RADARSAT-1). *Revista Brasileira de Geociências* (submetido).

CAPÍTULO III

A ESTEREOSCOPIA COM IMAGENS DE RADAR¹

RESUMO Este trabalho discute os conceitos relacionados à estereoscopia de radar e os aspectos que a influenciam. Diferentemente da estereoscopia óptica, a de radar necessita que se busque um equilíbrio entre as diferenças geométricas (paralaxes) e as similaridades radiométricas (visibilidade estereoscópica) das cenas do par. Alguns autores ainda discutem o nível de aplicabilidade da estereoscopia de radar, devido às dificuldades de percepção de profundidade, sob certas condições de relevo do terreno e de geometria de iluminação das cenas do par. São apresentados os resultados obtidos na região da Província Mineral de Carajás, através da análise de seis pares estereoscópicos, formados por imagens RADARSAT-1, em diferentes modos Standard (S5, S6 e S7) e azimutes de iluminação (78 e 282°). Os pares foram avaliados em diferentes tipos de relevo/geologia. Os resultados demonstraram a efetiva contribuição e aplicabilidade da estereoscopia de radar, quando são considerados aspectos que a influenciam e a experiência do intérprete neste tipo de abordagem.

INTRODUÇÃO O sistema SAR (“Synthetic Aperture Radar”) orbital do satélite canadense RADARSAT-1 permite observar uma mesma área de 35 diferentes modos, através da variação de seus ângulos de incidência (10 a 59°), de suas diferentes resoluções espaciais (10 a 100 m.) e áreas de cobertura (50x50 a 500x500 Km.). Além disso, é possível alterar a direção de visada através de órbitas ascendente ou descendente (respectivamente, 78 e 282° de azimutes nas latitudes equatoriais). Essa formidável gama de opções torna esses produtos ideais para a visão estereoscópica, uma ferramenta essencial em estudos geológicos. O entendimento dos conceitos nos quais se baseia a estereoscopia de radar; as implicações na sua performance, causadas pelas características da área a ser estudada, pelas variações dos ângulos de interseção estereoscópica, pelos azimutes de iluminação, pelos ângulos de interseção entre as duas órbitas e; as limitações e vantagens da estereoscopia com relação à visão monoscópica de radar são objetivos deste estudo, que tem como área teste a região da Província Mineral de Carajás, na Amazônia brasileira.

¹Este capítulo é baseado em: Santos *et al.* (1999)

O radar de abertura sintética tem, historicamente, desempenhado um papel fundamental na ampliação do conhecimento geológico da região Amazônica, a partir da implantação do Projeto RADAM, no início dos anos setenta (Silva *et al.* 1974). Uma versão mais moderna deste tipo de SAR foi usada pela DOCEGEO, no recobrimento da Província Mineral de Carajás, em 1992 (Graham & Moretsohn 1997). Da mesma forma, em abril de 1992, foi desenvolvido um extenso aerolevantamento de dados SAR na Amazônia, dentro do Experimento SAREX ("South American Radar Experiment-SAREX'92"), com o objetivo de simular os dados a serem obtidos com os satélites RADARSAT-1 e ERS-2, então com lançamentos previstos (Paradella *et al.* 1994; Paradella *et al.* 1997). A partir de novembro de 1995, com o lançamento do satélite RADARSAT-1, uma nova e diversificada fonte de dados SAR tornou-se disponível para aplicações geoambientais. Detalhes sobre este sistema podem ser encontrados em RADARSAT International (1995).

CONTEXTO GEOLÓGICO A Província Mineral de Carajás constitui uma das mais importantes reservas minerais do Brasil, com os maiores depósitos de ferro do mundo, além de importantes mineralizações em ouro, cobre, manganês e níquel. Ela integra a Plataforma Brasileira, na porção sudeste do Craton Amazônico, que se tornou estável antes do final do Pré-Cambriano (Almeida *et al.* 1981). Devido à sua complexidade geológica e ao nível de conhecimento restrito, o modelo de evolução tectônica da região é, ainda hoje, controverso.

Baseados em dados geocronológicos, Cordani & Brito Neves (1982) e Teixeira *et al.* (1989) propuseram para a área um modelo tectônico caracterizado por cinturões móveis proterozóicos, ao redor de um núcleo cratônico arqueano. As rochas granulíticas e migmatíticas a norte da Serra de Carajás são relacionadas ao Cinturão Maroni-Itacaiúnas, do Proterozóico Inferior, enquanto que as rochas gnáissicas, metavulcânicas e metassedimentares que constituem o corpo da Serra dos Carajás, são relacionadas à Província Amazônia Central, do Proterozóico Inferior/Arqueano. Hasui *et al.* (1984) e Hasui & Haraly (1985) propuseram um modelo alternativo, baseado em dados geofísicos e estruturais, em que o arcabouço tectônico do Craton Amazônico é constituído por diversos blocos crustais arqueanos independentes. Os limites desses blocos são caracterizados por anomalias gravimétricas positivas, fortes variações magnéticas e trends lineares das estruturas tectônicas. No núcleo desses blocos é comum a ocorrência de granitóides e de seqüências vulcano-sedimentares.

A Província Mineral de Carajás, de acordo com DOCEGEO (1988), é composta por três unidades principais: (1) Complexo Xingu, com gnaisses tonalíticos à granodioríticos e rochas meta-supracrustais; (2) Supergrupo Itacaiúnas, composto pelos grupos Grão-Pará (rochas metavulcânicas e metassedimentares) e Rio Fresco (metarenitos) e; (3) granitos proterozóicos. Segundo Araújo & Maia (1991) e Oliveira *et al.* (1994), a região de Carajás é parte do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas, de idade arqueana, separado por dois blocos crustais (blocos Belém e Araguacema). São distinguidos três domínios litoestruturais arqueanos na região: (1) Domínio Meridional, caracterizado por zonas de cisalhamento imbricadas, com rochas relacionadas aos complexos Xingu e Pium, Suíte Plaquê e Grupo Sapucaia; (2) Domínio Central, de natureza direcional, com transcorrências representadas pelos sistemas Serra dos Carajás (à evolução desse sistema, Araújo & Maia, 1991, associam um mecanismo do tipo flor positiva), Cinzento, Tapirapé e Buritirama, e; (3) Domínio Setentrional, caracterizado por cavalgamentos de rochas granulíticas, misturadas tectonicamente com partes do Complexo Xingu e, subordinadamente, seqüências metassedimentares. Idades radiométricas de cerca de 1,88 Ga. são associadas aos corpos graníticos anorogênicos (Machado *et al.* 1991, Macambira & Lafon 1995, Dall'Agnol *et al.* 1998).

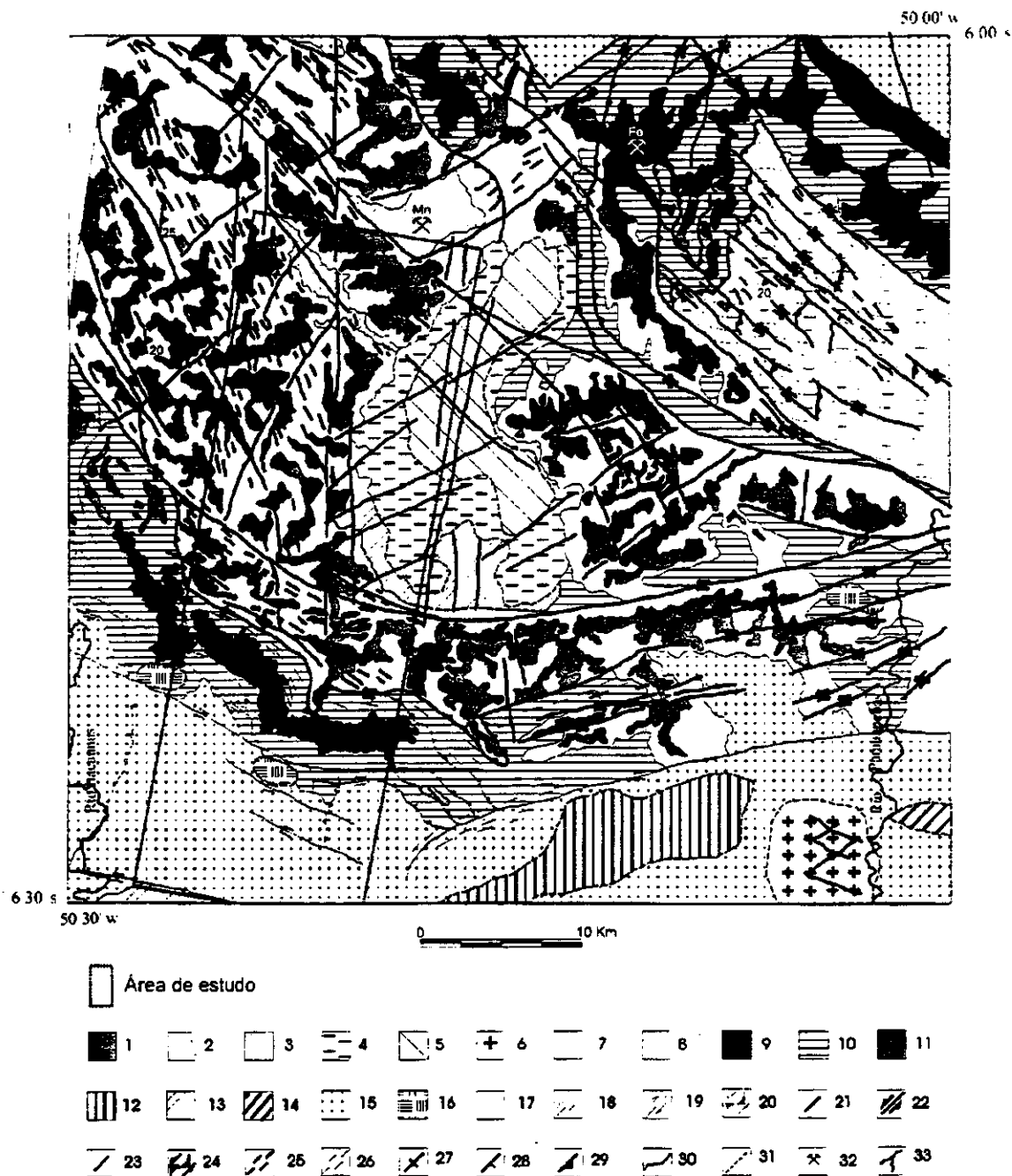
De acordo com Pinheiro (1997), a história estratigráfica e tectônica da região se inicia por um episódio de deformação dúctil sinistral (responsável pelo fabric milonítico do embasamento) seguido por, no mínimo, três episódios de deformação rúptil (responsáveis pelo desenvolvimento das principais feições estruturais/tectônicas, como os sistemas transcorrentes Cinzento e Carajás). O primeiro episódio de deformação rúptil dextral foi o responsável pelo desenvolvimento da estrutura sigmoidal de Carajás e pela preservação de parte das seqüências vulcânicas e sedimentares. Um evento posterior, transpressional sinistral, foi responsável pela inversão tectônica que afetou as rochas ao longo da Falha de Carajás. Os eventos rúpteis posteriores são relacionados a reativações dos sistemas de falhas.

Santos *et al.* (1997), utilizando-se de produtos de sensoriamento remoto multifonte (dados TM-LANDSAT, SAREX, RADARSAT-1 e gamaespectrométricos) sintetizaram, regionalmente, o atual conhecimento existente sobre a geologia da Folha Serra de Carajás (1: 100.000). Paradella *et al.*

(1998), utilizando produtos integrados de radar, dados petrográficos e de campo, caracterizaram a geologia da área do Granito Central de Carajás (fig. 1).

A ESTEREOSCOPIA E O RADAR O ser humano tem a natural capacidade de ver tridimensionalmente os objetos ao seu redor. A percepção de profundidade é um processo mental sofisticado e ainda hoje pouco conhecido, que combina indicadores fisiológicos e psicológicos (Toutin & Vester 1997). Os mais importantes indicadores são: a convergência, que é o ângulo entre os eixos visuais quando um par de olhos observa um objeto pontual e a disparidade binocular, que se refere às diferenças entre as imagens de um mesmo objeto projetadas em cada uma das retinas. A estereoscopia permite criar a percepção de profundidade, através da observação de um par de imagens planas. A estereoscopia, em qualquer tipo de imageamento, depende, fundamentalmente, de dois indicadores fotogramétricos: (a) a paralaxe estereoscópica ou horizontal ou x (busca reproduzir a disparidade binocular da visão humana), que pode ser entendida como a aparente mudança de posição de objetos, quando vistos de diferentes lugares e; (b) o ângulo de interseção estereoscópica (idem, com relação ao ângulo de convergência da visão humana), medido entre as linhas de visada do sensor em um determinado ponto no terreno, nas duas cenas do par. Em um mesmo par estereoscópico, a paralaxe e o ângulo de interseção estereoscópica são diretamente proporcionais à elevação do ponto observado.

Em um par ideal de imagens estereoscópicas, as duas cenas devem ser muito similares entre si na qualidade ou conteúdo temático (tom, textura, etc.), de modo que haja uma boa correlação radiométrica entre elas. O grau de visibilidade estereoscópica de um par, ou seja, a maior ou menor facilidade de percepção tridimensional, depende, diretamente, dessa similaridade radiométrica. Esse mesmo par, por outro lado, deve ser constituído por cenas com geometrias as mais díspares possível, para que apresentem grandes paralaxes que melhorem a percepção de profundidade (Leberl 1983, Fullerton *et al.* 1986, Toutin 1996, 1997). A visibilidade estereoscópica tem papéis fundamentalmente diferentes nos sensores ópticos e no radar. Nos sistemas ópticos, as alterações de geometria, que resultem na paralaxe necessária a visão tridimensional, não implicam em mudanças significativas na iluminação das cenas. O radar imageador, por outro lado, tem sua própria fonte de iluminação, o que significa que, quanto maiores forem as diferenças geométricas entre as cenas do par (obtidas através de alterações da geometria de visada), maiores serão as diferenças radiométrica



LEGENDA: 1 - Laterita; 2- Formação Gorotire: arenitos e conglomerados; Suite granítica anorogênica (3 - unidade desconhecida, baixo gama CT, 4 - Anfibólio-biotita-monzogranito; 5 - Biotita-anfibólio-sienogranito/biotita-monzogranito/biotita-sienogranito, 6 - Granito) Formação Águas Claras: arenitos, siltitos e argilitos (7 - indiviso, 8 - membro inferior: argilitos). Grupo Grão Pará (9 - Formação Carajás - formações feríferas bandadas, Formação Parauapebas, 10 - metabasaltos, 11- metariolitos); 12 - Complexo Pium: granulitos; 13 - Grupo Sapucaia: vulcanitos máficos/ultramáficos; 14 - Suite Plaquê: granitóides; 15 - Complexo Xingu: gnaisses, 16 - Unidade com alta resposta gama urânio; Zonas de cisalhamento (17 - dúcteis a dúcteis-rúpteis, 18 - sinistrais, 19 - destrais, 20 - rampas); Zonas de cisalhamento (21 - rúpteis, 22 - sinistrais, 23 - destrais, 24 - rampas); 25 - Fraturas, 26 - Foliações miloníticas cataclásticas (27 - verticais, 28 - inclinadas), 29 - Acamamentos; 30 - Contatos geológicos 31 - Limites sugeridos principalmente pelos dados gama, 32 - Minas; 33 - Rios.

Figura 1: Mapa Geológico Simplificado da Folha Serra dos Carajás (fontes: Santos *et al.* 1997, Paradella *et al.* 1998).

s entre elas. Ao contrário dos sensores ópticos, no radar imageador a visibilidade estereoscópica depende do equilíbrio entre as diferenças geométricas e as similaridades radiométricas das cenas do par.

O imageamento de radar produz efeitos de deslocamento do relevo diferentes daqueles observados nos sistemas ópticos. Nas imagens SAR, as estruturas verticais no terreno são deslocadas em direção ao sensor, enquanto que nas imagens ópticas, o deslocamento se dá inversamente. Os principais efeitos no relevo do terreno no imageamento de radar, são: foreshortening, layover e sombreamento. O foreshortening é o efeito de compressão na imagem de radar, das encostas voltadas para a antena (“foreslopes”). A maior quantidade de foreshortening ocorre quando a encosta é perpendicular a iluminação do radar. Neste caso, a antena receberá o sinal de retorno da base e do topo da encosta ao mesmo tempo, resultando na superposição dos dois pontos na imagem. O layover ocorre quando o sinal de retorno de radar do topo de uma encosta atinge a antena antes do que o sinal de sua base. O sombreamento de radar representa áreas sem nenhum tipo de informação (fig. 3).

Quanto menor for o ângulo de incidência da iluminação de radar, maiores serão os efeitos de foreshortening e layover e menores os de sombreamento. O fator fundamental, que condiciona a amplitude dessas distorções, é o tipo de relevo imageado. Em um relevo plano ou suavemente ondulado, por exemplo, os efeitos de relevo são minimizados, mesmo com a utilização de pequenos ângulos de incidência. Já em um relevo movimentado, uma iluminação sob maior ângulo de incidência diminui os efeitos de foreshortening e layover, porém aumenta as áreas sombreadas. Há, ainda, o efeito da micro-topografia (micro e meso-rugosidades) no retroespalhamento de radar. Em áreas planas o seu papel é fundamental, pois vai responder, em grande parte, pelo sinal de retorno de radar à antena. Neste sentido, quanto menor o ângulo de incidência maior será o efeito da micro-topografia no retroespalhamento do sinal de radar. Os efeitos de relevo devem ser considerados na composição de um par estéreo de radar, buscando a harmonia entre as geometrias de visada das cenas e as características do relevo da área, de forma que os efeitos indesejáveis sejam minimizados, ao mesmo tempo que se obtenha um bom realce morfológico e uma boa visibilidade estereoscópica.

O radar, devido a sua geometria de observação lateral, permite que se componha, de acordo com o azimute de iluminação, pares de cenas com dois tipos de estereoscopia: de mesmo sentido e de sentidos opostos. No primeiro caso, uma mesma área é iluminada em um único sentido nas duas cenas, ocorrendo apenas variações, normalmente não muito expressivas, em seus ângulos de incidência. No segundo caso, uma mesma área é iluminada obliquamente em sentidos opostos, ocorrendo uma variação entre os ângulos de incidência, normalmente, bastante ampla. Portanto, a estereoscopia de mesmo sentido privilegia a correlação radiométrica entre as duas cenas do par, enquanto que a estereoscopia de sentidos opostos realça a disparidade geométrica entre elas. Diversos estudos teóricos e práticos têm sido realizados sobre a aplicabilidade da estereoscopia de sentidos opostos, pelas dificuldades impostas devido à grande diferença de iluminação entre as cenas (La Prade 1963, Leberl 1983, Fullerton *et al.* 1986, Toutin, 1996, 1997, 1998, Vester & Toutin 1997). Alguns autores consideram-na impraticável ou restrita a relevos planos a suavemente ondulados, porém, os trabalhos mais recentes sugerem que o treino e a experiência do fotointérprete permitem a sua utilização na maioria das situações. Há ainda que se considerar o ângulo de interseção entre as linhas de vôo (órbitas) das duas cenas do par. Para haver percepção estereoscópica, esse ângulo não deve ser maior do que 40° (Kobrick *et al.* 1986, Toutin 1996).

DADOS RADARSAT-1 Diversos estudos radargramétricos têm sido desenvolvidos para avaliar a acurácia geométrica na geração de modelos digitais de elevação (“DEM - Digital Elevation Model”) através de imagens RADARSAT-1 (Toutin 1997, 1998, Raggan & Gutjahr 1998). Segundo Toutin (1998), o uso da estereoscopia melhora em 20 a 40% a acurácia da altimetria, com imagens no modo standard. A acurácia de medidas planimétricas, desenvolvidas pelo autor em um par estéreo F1-F5, foi da ordem de uma cela de resolução (7 a 9 metros). Nos sensores ópticos, o critério normalmente usado para avaliar a configuração estéreo de um par de cenas é o ângulo de interseção estereoscópica (maior ângulo = maior paralaxe). Toutin (1998) demonstra, através de cenas RADARSAT-1, que, na estereoscopia de radar, o ângulo de interseção não é o melhor indicador. Na figura 2, o autor exemplifica duas situações: (a) em uma configuração estéreo de mesmo sentido, entre os dois pares com o mesmo ângulo de interseção estereoscópica, aquele com geometria de iluminação mais verticalizada apresenta uma paralaxe maior; (b) em uma configuração estéreo de sentidos opostos, entre dois pares, aquele com o menor ângulo de interseção estereoscópica apresenta a maior paralaxe. Toutin (1998) sugere um critério mais adequado para a análise da

configuração estéreo de radar, a partir da definição de paralaxe de elevação, como: $p = h [\cot d - \cot e]$ (1), onde p é a paralaxe, h a elevação do alvo e d e e os ângulos de incidência das imagens da direita e da esquerda, respectivamente (fig. 2). O autor propõe, então, o índice Razão de Paralaxe Vertical (RPV), $p/h = [\cot d - \cot e]$ (2), que tem relação direta com a paralaxe.

A posição das cenas RADARSAT-1 em um par estéreo depende da posição do sensor (S5, S7, etc.), do sentido da órbita (ascendente ou descendente) e do tipo de estereoscopia (mesmo sentido ou sentidos opostos). Na estereoscopia de mesmo sentido, ascendente (iluminação para leste), a cena com maior ângulo de incidência deve ficar à esquerda. No caso de duas cenas descendentes, ocorre o inverso. Na estereoscopia de sentidos opostos, a cena descendente deve ficar sempre à esquerda (fig. 2). A posição aparentemente inversa das cenas, em relação aos sensores ópticos, deve-se ao deslocamento de relevo em sentidos opostos nos dois tipos de sensores (Vester & Toutin 1997). O que ocorre, simplificadaamente, é que uma observação oblíqua de radar, em um determinado sentido, equivale à de um sensor óptico em sentido oposto, à 90° da iluminação (fig. 3).

Finalmente, um outro aspecto a considerar refere-se à área efetiva de estereoscopia com imagens RADARSAT-1. Dependendo da configuração usada (modo, posição, etc.), a proporção de superposição entre as cenas dos pares pode variar muito. Segundo D'Iorio *et al.* (1997), nas latitudes equatoriais, enquanto um par de cenas no modo standard S1/S6 apresenta uma área de superposição de 96%, um outro par standard S3/S4 tem apenas 30% de recobrimento.

Na investigação em Carajás foram usados conjuntos de imagens RADARSAT-1, no modo standard, cópias em papel, na escala de 1:250.000. As imagens, adquiridas durante o Programa de Avaliação do RADARSAT-1 na Amazônia Brasileira (ADRO), foram originalmente processadas no formato de filmes negativos pela RSI (RADARSAT International). As imagens foram recebidas sem qualquer correção geométrica, de modo a possibilitar a visão estereoscópica, tendo sido posteriormente ampliadas em papel positivo, no laboratório da DGI (Divisão de Geração de Imagens) do INPE em Cachoeira Paulista. As características das imagens estão especificadas na tabela 1 e as dos pares estereoscópicos na tabela 2.

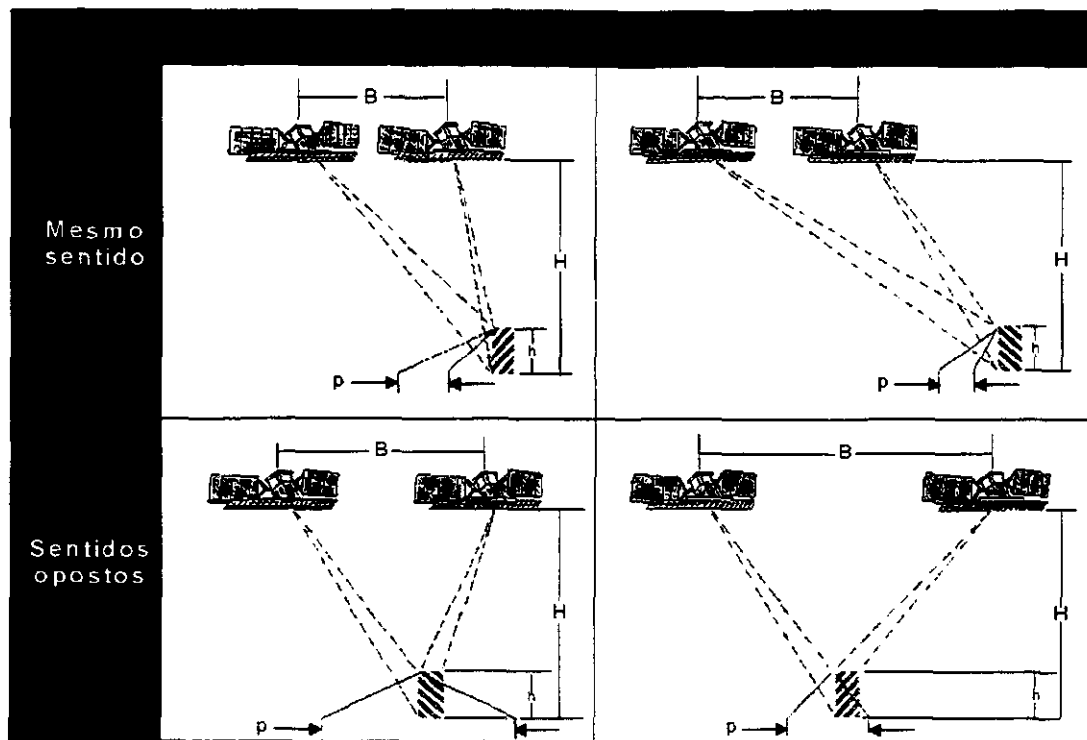


Figura 2: Exemplos de pares estéreo RADARSAT-1 com configurações de mesmo sentido e de sentidos opostos (Toutin 1998).

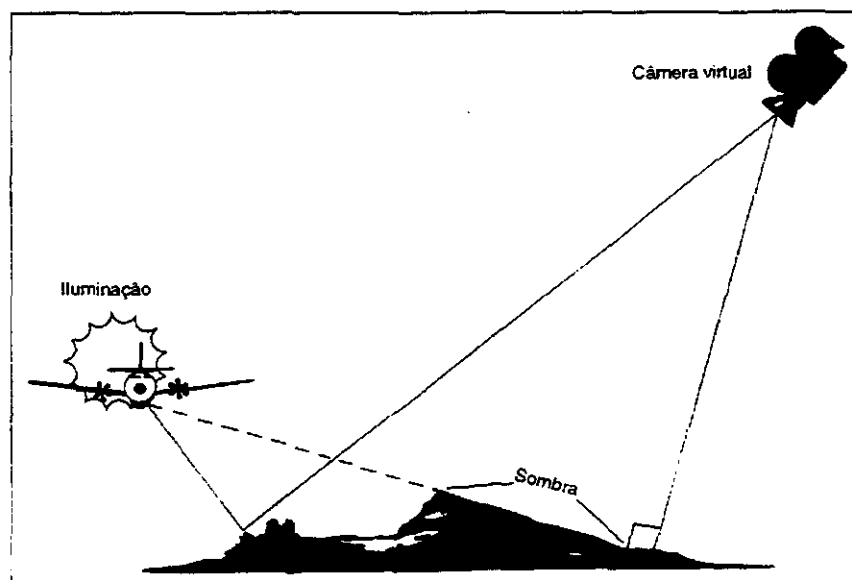


Figura 3: Visão de perspectiva do imageamento do radar de visada lateral (fonte: Raney, 1998).

Tabela 1: Características gerais dos dados RADARSAT-1 usados na investigação.

Modo	Posição	Data De Aquisição	Angulo De Incidência (graus)	Resolução Espacial (m)	Tamanho do Pixel (m)	Número De Looks	Formato Da Imagem	Sentido da Órbita	Geometria de Iluminação (azimute)
S T A N D A R D	S5	31/05/96	36/42°	24.2X27	12.5X12.5	1X4	16-bits Path Image	Descendente	282°
	S5	28/08/97	36/42°	24.2X27	12.5X12.5	1X4	16-bits Path Image	Ascendente	78°
	S6	28/11/96	41/46°	22,1X27	12.5X12.5	1X4	16-bits Path Image	Ascendente	78°
	S7	11/09/96	45/49°	22.09X27	12.5X12.5	1X4	16-bits Path Image	Descendente	282°

Tabela 2: Características dos pares estereoscópicos RADARSAT-1.

Pares Estereoscópicos	Mesmo sentido		Sentidos opostos			
	S5DxS7D	S6AxS5A	S5DxS5A	S5DxS6A	S7DxS5A	S7DxS6A
Razão de Paralaxe Vertical (RPV)	0,30	0,18	2,47	2,29	2,16	1,99
Angulo de Interseção Estereoscópica	8,0°	4,5°	78,0°	82,5°	86,0°	90,5°
Angulo de Interseção Entre Órbitas	0°	0°	24°	24°	24°	24°

A= ascendente D= descendente

RESULTADOS E DISCUSSÕES A Serra dos Carajás representa um relevo montanhoso e dissecado em escarpas, com altitudes de até 850 metros, sendo constituída, essencialmente, por sedimentos (Formação Águas Claras) e rochas vulcano-sedimentares de baixo grau (Formações Carajás e Parauapebas). Na parte central da Serra, a uma altitude de 450 a 500 metros e com um relevo predominantemente colinoso, ocorre um batólito granítico, o Granito Central. No entorno da Serra, em áreas arrasadas, afloram rochas gnáissicas do Complexo Xingu, em uma planície com

altitudes médias de 200 a 300 metros. Essas três regiões, com características distintas de relevo, de litologia, estrutura e evolução geológica, foram escolhidas para avaliar os pares estereoscópicos RADARSAT-1 (fig. 1).

Par S5DxS7D O par estereoscópico de mesmo sentido, descendente. S5DxS7D (fig. 4), apresenta ótima visibilidade estereoscópica, devido ao pequeno ângulo de interseção estereoscópica (8°) e ângulo de interseção entre as órbitas de 0° .

Nas áreas associadas aos relevos mais elevados (serras), apesar da pequena Razão de Paralaxe Vertical do par ($RPV=0.30$), o realce morfológico é ótimo, tornando bastante prática e precisa a localização e a caracterização dos elementos fotointerpretativos, que permitem a definição das estruturas geológicas (feições lineares e alinhamentos de drenagem); de suas atitudes (assimetrias de relevo/drenagem) e; dos limites entre unidades geológicas (quebras negativas). O azimuth de iluminação do par (282°) é pouco favorável à caracterização do principal trend estrutural (NW-SE a WNW-ESSE), em especial quando este se aproxima da direção WNW-ESE (fig. 4, letra A). Apesar dessa dificuldade, a visão estereoscópica ainda é muito mais eficiente do que a monoscópica, particularmente na definição de lineamentos paralelos à iluminação do SAR. Em adição, outros três conjuntos principais de estruturas são muito bem realçados: N-S, NNE-SSW e NE-SW a ENE-WSW (fig. 4, letras B, C e D). Todos esses conjuntos são interpretados como estruturas planares de alto ângulo de mergulho. Já o caráter sub-horizontal das coberturas lateríticas (fig. 4, letra E), assim como os baixos ângulos de mergulho das camadas areníticas da Formação Águas Claras (fig. 4, letra F), são bem caracterizados.

Na área do Granito Central, as nuances do relevo topográfico são percebidas com detalhe neste par estereoscópico. A continuidade da Falha de Carajás e a de seu braço principal (fig. 4, letra G), ao longo do corpo granítico, indicam claramente a reativação dessas antigas discontinuidades. Conjuntos de fraturas com direções NE-SW e N-S (fig. 4, letras H e I) também são facilmente visualizados. Todas essas discontinuidades são de alto ângulo de mergulho. Já nas áreas de planície, praticamente não há vantagens da visão estereoscópica em relação à monoscópica, devido a dois motivos principais: (a) a baixa RPV ($0,30$), implicando em um pequeno realce morfológico em uma área de poucas variações altimétricas; e (b) ângulos de incidência das cenas do par muito elevados

($S5=36/42^\circ$, $S7=45/49^\circ$), para uma área plana, onde a modulação do sinal retroespalhado de radar depende, basicamente, da micro-topografia.

Com relação aos efeitos de relevo, este par é bastante equilibrado, levando-se em consideração as grandes variações altimétricas e os tipos de relevo existentes na área analisada. Dessa forma, os efeitos de foreshortening (não há ocorrência de layover, devido aos altos ângulos de incidência das cenas) e de sombreamento não tiveram qualquer significância notável na visão estereoscópica, mesmo nas áreas de relevo mais movimentado.

Par S6AxS5A O par estereoscópico de mesmo sentido, ascendente, S6AxS5A é, entre os analisados, o que tem o menor ângulo de interseção estereoscópica ($4,5^\circ$) e o ângulo de interseção entre órbitas é de 0° . Estas duas características dão ótima visibilidade estereoscópica ao par, em todas as três regiões analisadas. O único desconforto para o observador, que pode ocorrer inicialmente, é uma inversão estereoscópica do relevo, devido ao azimute de iluminação das duas cenas (78°), contrário ao dos sistemas ópticos mais normalmente utilizados (na visão monoscópica, a sensação de inversão de relevo é evitada pelo posicionamento do observador à 90° da iluminação de radar, como ilustrado na figura 3). É, também, o par com a menor Razão de Paralaxe Vertical – RPV (0,18).

Na região de serra, é bom o realce morfológico observado neste par. O seu azimute de iluminação é bastante favorável na caracterização do principal trend estrutural (WNW-ESE a NW-SE), e dos conjuntos de estruturas com direções aproximadas N-S e NNE-SSW. Já o conjunto de direção NE-SW a ENE-WSW, tende a tornar-se de mais difícil caracterização, à medida em que se paraleliza com a iluminação do SAR. Na região do Granito Central, a percepção tridimensional é menos realçada que no par anterior, devido à pequena disparidade geométrica entre as cenas do par (RPV = 0,18). Apesar disso, os principais conjuntos de estruturas planares são bem caracterizados. Com relação à área de ocorrência do Complexo Xingu, mesmo com uma geometria teoricamente menos favorável, a performance de realce morfológico desse par estereoscópico é equivalente a do par anterior. Da mesma forma, com relação aos efeitos de relevo, o comportamento equivale ao do par descendente, mesmo porque não há grandes diferenças entre os ângulos de incidência das duas

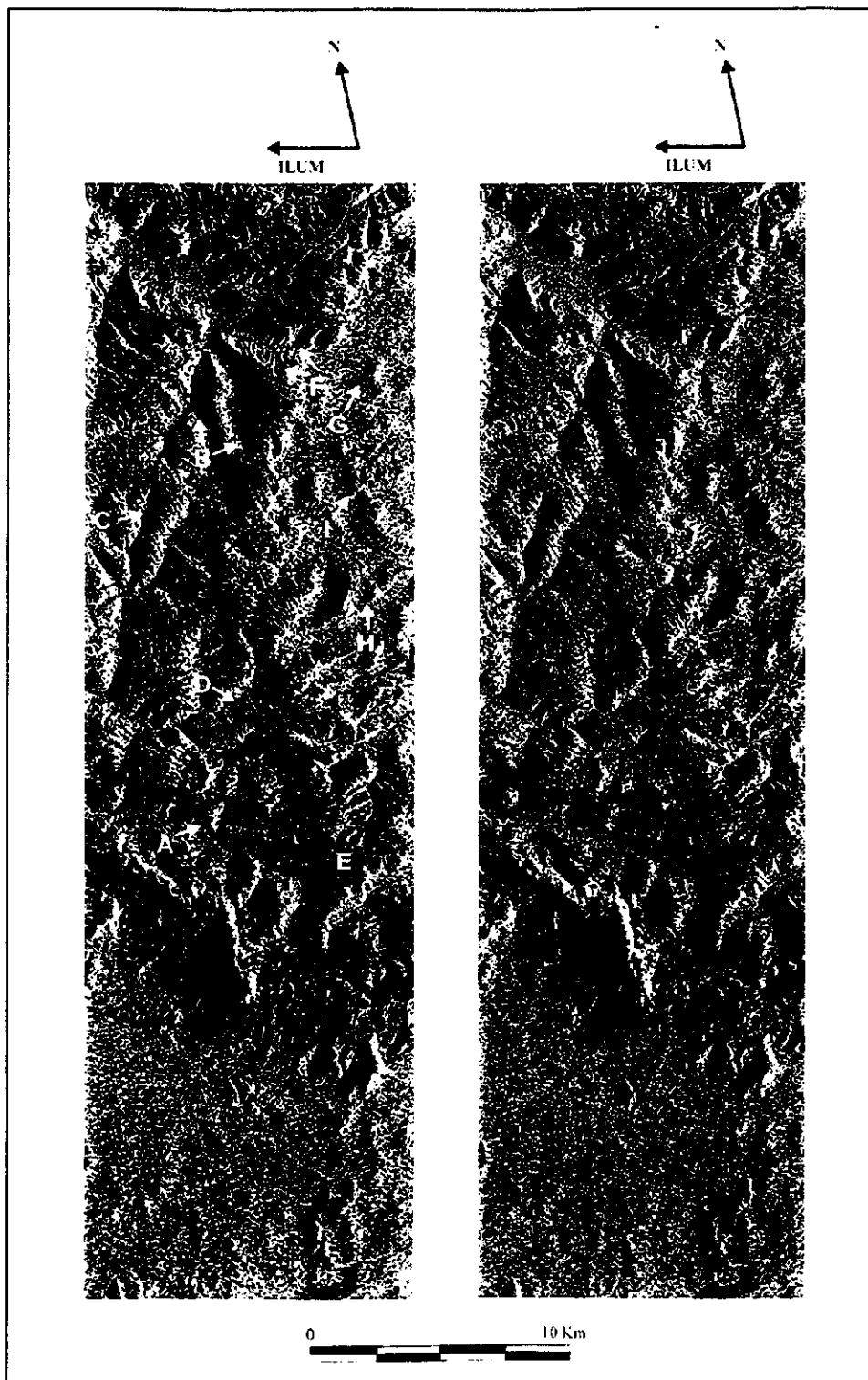


Figura 4: Par estereoscópico S5DxS7D. As letras são discutidas no texto.

cenas, nos dois pares. Os efeitos de foreshortening e sombreado, portanto, não restringiram significativamente a visão estereoscópica nos casos analisados.

Pares S5DxS5A e S5DxS6A Os pares estereoscópicos de sentidos opostos S5DxS5A (fig. 5) e S5DxS6A apresentam, entre si, um comportamento muito semelhante, devido à pequena variação nos ângulos de incidência das cenas. Eles apresentam ângulos de interseção estereoscópica muito altos ($78,0^\circ$ e $82,5^\circ$, respectivamente) e ângulo de interseção entre órbitas de 24° , resultando em uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, principalmente nas áreas de relevo mais movimentado, onde há sérias dificuldades de se obter, inicialmente, a visão tridimensional. Tais pares exibem as maiores disparidades geométricas entre os analisados (RPV's de 2,47 e 2,29, respectivamente).

As principais dificuldades na utilização desses pares na área de serra foram: (a) a ausência inicial de percepção estereoscópica, devido à grande disparidade radiométrica entre as cenas (sombras e outros efeitos de relevo em posições opostas), e ao ângulo de interseção entre órbitas, que cria uma nova perspectiva em que um objeto é iluminado, nas duas cenas, de acordo com um ângulo oblíquo (no caso, $180-24=156^\circ$); (b) a inversão estereoscópica de relevo, devido aos azimutes de iluminação em posições opostas; (c) o campo restrito de visão estereoscópica, ou seja, a dificuldade de acompanhar as feições de imagem e; (d) desconforto e cansaço do intérprete, em trabalhos sistemáticos. À medida em que aumenta a experiência na análise com esses pares, a maioria desses entraves pode ser, ao menos parcialmente, superada. Apesar das restrições, o realce morfológico dessas áreas de relevo mais movimentado é muito bom nesses dois pares, sem que isso represente, contudo, uma vantagem com relação aos de mesmo sentido. A única grande vantagem está no realce das estruturas planares. Há, nesse caso, uma complementação entre as duas iluminações, resultando em um bom realce de todos os principais conjuntos de estruturas

Na região do batólito granítico, os efeitos restritivos na visão tridimensional desses pares são de menor intensidade devido ao tipo de relevo, menos acidentado, que melhora a correlação radiométrica entre as cenas. As grandes RPV's desses pares resultam em um realce morfológico

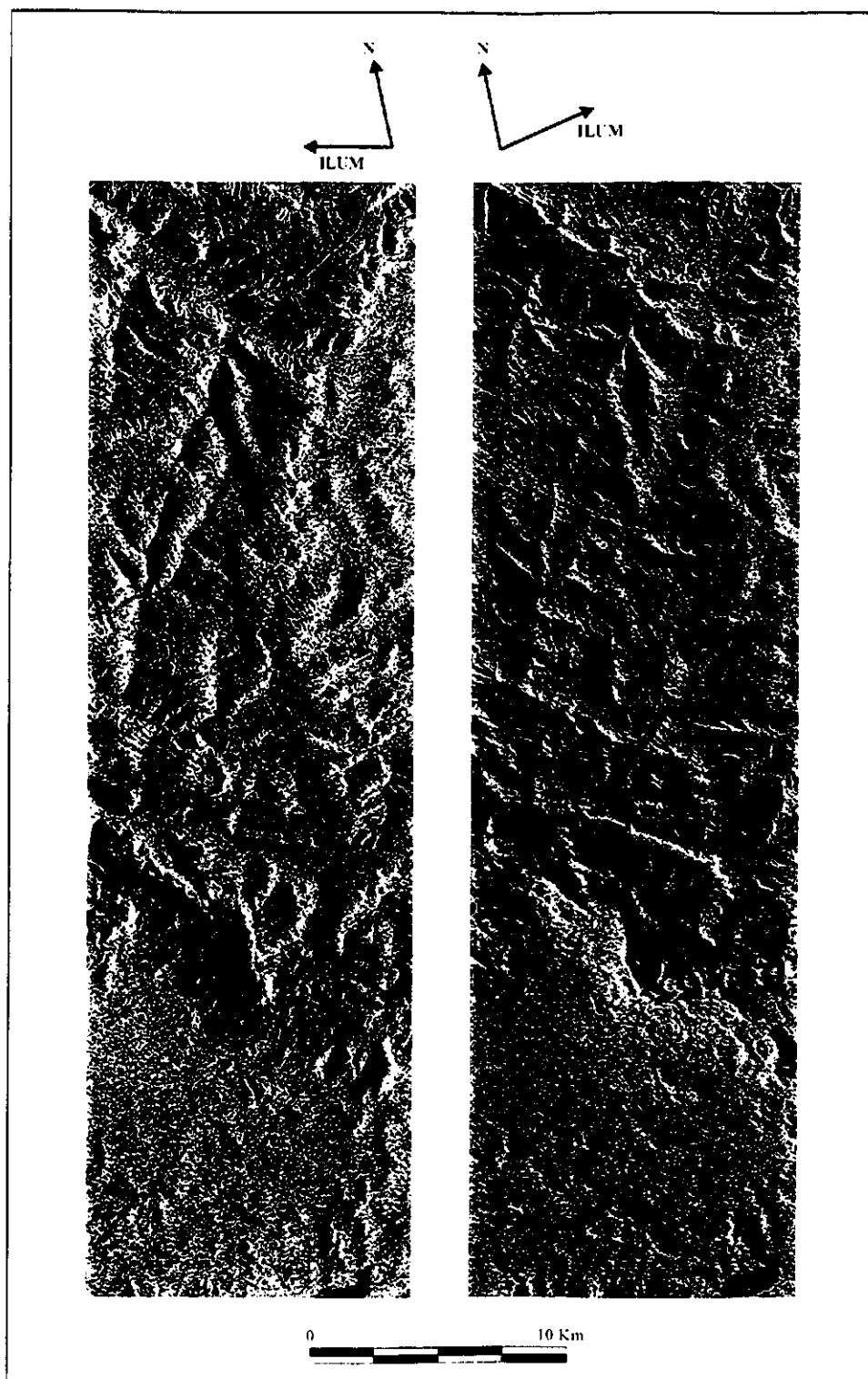


Figura 5: Par estereoscópico S5DxS5A.

ligeiramente superior ao observado nos pares de mesmo sentido. O realce das estruturas, pelos diferentes azimutes de iluminação das duas cenas, é, também, uma vantagem em relação à estereoscopia de mesmo sentido. Na planície a sul da Serra dos Carajás, a percepção de profundidade é muito restrita. Apesar das grandes RPV's, a performance desses pares é, apenas, sutilmente superior aos de mesmo sentido. A explicação deve estar nos ângulos de incidência das cenas dos dois pares, muito altos para uma planície, onde a modulação do sinal de radar retroespalhado é dependente, basicamente, da micro-topografia (rugosidade superficial).

Pares S7DxS5A e S7DxS6A A exemplo dos anteriores, os pares estereoscópicos S7DxS5A e S7DxS6A apresentam, entre si, um comportamento muito semelhante. Apresentam os maiores ângulos de interseção estereoscópica ($86,0^\circ$ e $90,5^\circ$, respectivamente) entre os pares analisados e o ângulo de interseção entre as órbitas é de 24° . Há também uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, mais crítica nos relevos mais movimentados. As dificuldades práticas de visão estereoscópica, descritas anteriormente para as regiões da serra e do Granito Central, são válidas, também, para esses pares. Apesar de apresentarem RPV's menores do que nos dois pares anteriores (2,16 e 1,99, respectivamente), não é notável qualquer alteração no exagero vertical nessas duas regiões analisadas. O que é perceptível, dado o maior ângulo de incidência de uma das cenas, é um pequeno aumento da área sombreada. Na planície, a estereoscopia desses pares foi menos eficiente que os dois anteriores, consequência de suas geometrias de iluminação mais oblíquas (menor efeito da micro-topografia) e de suas menores RPV's (menor paralaxe).

Os resultados dessa análise, com a performance de cada conjunto de pares na caracterização geológica das três regiões estudadas, estão sumariados na tabela 3.

Tabela 3: Performance dos pares estereoscópicos Standard RADARSAT-1 em função da geologia/relevo.

Pares Estereoscópicos / Unidades Geológicas (Tipos de relevo)	Mesmo sentido		Sentidos opostos			
	S5DxS7D	S6AxS5A	S5DxS5A	S5DxS6A	S7DxS5A	S7DxS6A
Fms. Aguas Claras, Carajás e Parauapebas (Escarpa)	O	B	B	B	M-B	M-B
Granito Central de Carajás (Colina)	B	M	B-O	B-O	B-O	B-O
Complexo Xingu (Planície)	R	R	R-M	R-M	R	R

O= ótimo B= bom M= médio R= ruim

CONCLUSÕES A análise dos pares estereoscópicos RADARSAT-1 utilizados na região de Carajás demonstrou que: (a) nas áreas de relevo escarpado da Serra, os melhores resultados foram obtidos com a estereoscopia de mesmo sentido, descendente (evita a sensação de inversão de relevo), em pares com pequenos ângulos de interseção estereoscópica (características que dão ótima visibilidade estereoscópica ao par), paralaxes modestas (não há a necessidade de grandes exauros verticais); (b) nos relevos colinosos do Granito Central, a maior paralaxe da estereoscopia de sentidos opostos mostrou-se mais efetiva no realce de profundidade, sem uma significativa perda de visibilidade estereoscópica, apesar dos ângulos de interseção estereoscópica extremamente grandes e; (c) nas áreas de planície do Complexo Xingu, a menor incidência (observação mais verticalizada) nos pares apresentou um papel mais importante do que a paralaxe no realce do terreno (micro-topografia). Na estereoscopia de radar há a necessidade de buscar-se um equilíbrio entre a similaridade radiométrica e a disparidade geométrica do par estereoscópico, para que se obtenha, ao mesmo tempo, uma boa visibilidade estereoscópica e grandes paralaxes. Cabe salientar que, a experiência do fotointérprete desempenha um papel vital na extração da informação geológica, particularmente em relevos acidentados, com estéreo-pares de radar sob visadas opostas. De modo geral, a estereoscopia SAR mostrou-se vantajosa em relação à análise monoscópica. Contudo, a abordagem em estéreo depende adicionalmente, de uma seleção adequada das cenas do par e da consideração pelo geocientista do custo das imagens e da área efetiva de estereoscopia do par.

Agradecimentos À CSA (“Canadian Space Agency”) pelos dados RADARSAT-1, à FAPESP (Projeto 1997/10946-4) e ao CNPq (Projeto 300985/90-8), pelo suporte financeiro à investigação.

REFERÊNCIAS

- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck R. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an introduction. *Earth Science Review*, 17: 1-9.
- Araújo O. J. B. de & Maia R. G. N. 1991. *Serra dos Carajás, Folha SB-22-Z-A*. Relatório Final. CPRM. Rio de Janeiro, Brasil. 136p.
- Cordani U. G. & Brito Neves B. B. 1982. The geologic evolution of South America during the Archean and early Proterozoic. *Revista Brasileira de Geociências*, 12: 78-88.
- Dall’Agnol R., Costi R., Leite A. A. S., Magalhães M., Teixeira N. P. 1999. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. *Precambrian Research*, 95(1-2): 9-39.
- D’Iorio M.A., Budkewitsch P., Mahmood N.N. 1997. Practical considerations for geological investigations using RADARSAT-1 stereo images pairs in tropical environments. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- DOCEGEO 1988. Revisão litoestratigráfica da Província Mineral de Carajás. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 25, Belém, *Anexo*, 10-54.
- Fullerton J.K., Leberl F.W., Marque R.E. 1986. Opposite side SAR image processing for stereo viewing. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, 52 (9): 1487-1498.
- Graham D. F. & Moretzohn J. S. 1997. Airbone radar data: utility for geological mapping in tropical environments, Serra Pelada, Pará, Brazil. *CIM Bulletin*, 90: 108-113.
- Hasui Y., Haraly N. L. E., Schobbenhaus C. 1984. Elementos geofísicos e geológicos da Região Amazônica: subsídios para o modelo geotectônico. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 1, Manaus, Anais, 1: 129-141.
- Hasui Y. & Haraly N. L. E. 1985. Integração de informações geofísicas e geológicas na definição de estruturas crustais brasileiras. *Revista Brasileira de Geofísica*, 4: 248-249.
- Kobrick M., Leberl F.W., Raggan J. 1986. Radar stereo mapping with crossing flight lines. *Canadian J. Remote*

Sensing, 12 (9): 132-148.

La Prade G.L. 1963. An analytical and experimental study of stereo for radar. *Photogrammetric Eng.*, 29: 294-300.

Leberl F.W. 1983. Photogrammetric aspects of remote sensing in the imaging radar. *Remote Sensing Reviews*, 1: 71-158.

Macambira M. J. B. & Lafon J. M. 1995. Geocronologia da Província Mineral de Carajás: síntese de dados e novos desafios. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*, 7: 263-288.

Machado N., Lindenmayer Z., Krough T. E., Lindenmayer D. 1991. U-Pb geochronology of Archean magmatism and basement reactivation in the Carajás area, Amazon Shield, Brazil." *Precambrian Research*, 49: 329-354.

Oliveira J. R. de, Silva Neto C. S., Costa E. J. de S. 1994. *Serra Pelada, Folha SB-22-X-C*. Relatório Final. Rio de Janeiro, CPRM, 220 p.

Paradella W. R., Liu C. C., Veneziani P., Santos A. R., Bignelli P. A., Dias R. R., Singhroy V. H. 1994. An overview of SAREX'92 (South American Radar Experiment) data acquisition and preliminary results from Carajás Mineral Province (Brazilian Amazon Region). In: ERIM, Thematic Conference on Geologic Remote Sensing, 10, San Antonio, Texas, *Proceedings*, 1: 214-225.

Paradella W. R., Bignelli P. A., Veneziani P., Pietsch R. W., Toutin T. 1997. Airbone and spaceborne synthetic aperture radar (SAR) integration with Landsat TM and gamma ray spectrometry for geological mapping in a tropical rainforest environment , the Carajás Mineral Province, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (7): 1483-1501.

Paradella W. R., Santos A. R., Dall'Agnol R., Pietsch R. W., Sant'Anna M. V. 1998. A geological investigation based on airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT-1) SAR integrated products in the Central Serra dos Carajás Granite area, Brazil. *Canadian Journal of Remote Sensing* , 24 (4): 376-392.

Pinheiro R. V. L. 1997. *Reactivation history of the Carajás and Cinzento Strike-Slip Systems, Amazon, Brazil*. University of Durham, UK, Ph.D Dissertation, 408 p.

RADARSAT International 1995. *RADARSAT Illuminated – Your Guide to Products & Services*. British Columbia, Canada, RADARSAT International, 1-1 – 4-7 p.

Raggam H. & Gutjahr K. 1998. DEM generation using RADARSAT stereo data. In: ADRO, Final Symposium, Montreal, Canada, *ADRO 433*.

- Raney K. 1998. Radar fundamentals: Technical perspective. In: F. M. Henderson & A. J. Lewis (eds.) *Principles & applications of imaging radar. Manual of Remote Sensing*. New York. Am. Soc. Phot. and Rem. Sens., 9-130.
- Santos A. R., Paradella W. R., Veneziani P., Liu C. C., Sant'Anna M. V. 1997. Integração de dados SAR-TM e SAR-GAMA em estudos geológicos na Província Mineral de Carajás (Brasil). In: SELPER, Simposio Latinoamericano de Percepcion Remota, 8, Mérida, Venezuela. *CD-ROM*.
- Santos A. R., Paradella W. R., Veneziani P., Morais, M. C. 1999. A estereoscopia com imagens RADARSAT-1: Uma avaliação geológica na Província Mineral de Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 29 (4) (in press).
- Silva G. G., Lima M. I. C., Andrade A. R. F., Issler R. F., Guimarães G. 1974. *Folha SB-22 Tocantins: Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Uso Potencial da Terra*. Rio de Janeiro, Projeto RADAM, v. 4.
- Teixeira W., Tassinari C. C. G., Cordani U. G., Kawashita K. 1989. A review of the geochronology of the Amazonian Craton: tectonic implications. *Precambrian Research*, 42: 213-217.
- Toutin T. 1996. Opposite Side ERS-1 SAR Stereo Mapping over Rolling Topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34 (2): 543-549.
- Toutin T. 1997. Évaluation de la géométrie des images RADARSAT: Premiers résultats. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*
- Toutin T. 1998. Stereo RADARSAT for mapping applications. In: ADRO, Final Symposium. Montreal, Canada, *ADRO 453*.
- Toutin T. & Vester C. 1997. Understanding RADARSAT data in stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.
- Vester C. & Toutin T. 1997. A training package on: How to use RADARSAT Data in Stereo. In: ADRO, International Symposium: Geomatics in the Era of RADARSAT, Ottawa, Canada, *CD-ROM*.

CAPÍTULO IV

FUNDAMENTOS DA CROMOESTEREOSCOPIA¹

INTRODUÇÃO Através do processo normal de visão nós avaliamos a forma, a distancia e a cor dos objetos que nos rodeiam. Entretanto, para representar uma informação tridimensional em uma superfície plana, é necessário o entendimento das relações espaciais entre os níveis percepção e concepção.

Pesquisas psicológicas indicaram que a performance na análise de uma imagem plana é significativamente maior quando o observador tem algum conhecimento antecipado sobre a figura que está observando. Assim, um especialista em sensoriamento remoto com algum conhecimento *a priori* dos dados e do terreno e com um bom entendimento dos processamentos, tem uma maior experiência qualitativa.

A cromoestereoscopia oferece uma ferramenta para a percepção qualitativa de profundidade. Objetos diferentemente coloridos, observados a uma mesma distância, freqüentemente parecem situar à diferentes profundidades (Einhoven 1885). Esta aparente diferença de profundidade pode ser realçada por processos de refração. Portanto, esses dois fenômenos conhecidos podem ser usados para a fusão de dados de sensoriamento remoto multifonte e para a percepção qualitativa de profundidade em uma única imagem. Neste método, a profundidade real é codificada em cores, e então, essas cores são decodificadas através dos princípios básicos da óptica, para produzir a percepção de profundidade. Quando se observa uma imagem color-codificada usando a cromoestereoscopia, o efeito estéreo é baseado em fatores fisiológicos e psicológicos da cor e da profundidade.

A cromoestereoscopia permite apenas a percepção qualitativa de profundidade, não sendo possível a extração de informações quantitativas, que podem ser obtidas diretamente dos dados de entrada. Portanto, serão discutidos apenas os aspectos qualitativos do

¹ Este capítulo é baseado em: Toutin (1997).

-

processo. Serão examinados alguns aspectos que desempenham um importante papel nesse método, relacionados aos nossos olhos e cérebro, que fazem parte do “sensor” que adquire e percebe informações. Após a revisão dos processos de estéreo visão aplicados ao sensoriamento remoto e a descrição em detalhe do olho como um sensor, serão examinados o método de cromoestereoscopia e os óculos ChromaDepth™, desenvolvidos por Steenblik (1986). Finalmente, as técnicas para controlar os parâmetros de entrada dos processamentos geométrico e radiométrico serão analisados.

MÉTODOS DE ESTÉREO-VISÃO Diferentes métodos foram desenvolvidos para recriar a percepção de profundidade (Okoshi 1976). A percepção de profundidade pode ser “natural”, com duas imagens tomadas de diferentes pontos de observação, para gerar um par estereoscópico, ou “sintética”, para gerar uma visão em perspectiva. Na percepção de profundidade natural, figuras estereoscópicas são observadas separadamente por cada olho: a perspectiva à direita pelo olho direito e a perspectiva à esquerda pelo olho esquerdo.

Segundo Okoshi (1986), a primeira tentativa de desenvolver um desenho estereoscópico ocorreu por volta de 1600. Hoje, estéreo pinturas são criadas pela junção das perspectivas à direita e à esquerda. Da mesma forma muitas proposições de cinema 3-D têm sido desenvolvidas desde a criação do cinema estereoscópico polarizado, em 1939: algumas utilizavam projeções simultâneas na tela para criar a paralaxe, enquanto que outras baseavam-se na ilusão psicológica através de projeções com grande angular.

Todas as técnicas de imageamento descritas anteriormente baseavam-se apenas em dois indicadores: paralaxe binocular e convergência. A invenção da holografia (Gabor 1948) foi particularmente significativa porque ela apresentou, pela primeira vez, um método de imageamento espacial com o indicador acomodação. Além disso, ela é a única fotografia verdadeiramente tridimensional, e pode ser vista das mais diferentes perspectivas, exatamente como é possível com os objetos (Friedhoff & Benzon 1991). A holografia aplicada ao sensoriamento remoto também foi realizada através do processamento digital e óptico de um par estéreo MSS-Landsat (Benson *et al.* 1985.).

O OLHO COMO UM SENSOR O olho é o órgão através do qual o homem adquire informações sobre o seu meio ambiente, pela luz refletida e/ou emitida pelos objetos que compõem este meio. Para o homem a informação adquirida através dos olhos tem, indubitavelmente, um papel principal nas interpretações sobre o seu meio ambiente. Além disso, o poder para integrar uma imagem observada, através do reconhecimento do seu contorno, da sua cor, e das suas relações com outros objetos, indica que o processo de visão não consiste apenas na observação, mas também na percepção e entendimento através do sistema nervoso central. O olho, considerado parte do cérebro, é fundamentalmente um organizador. Iniciando-se com a atividade da retina, o olho/cérebro está ativamente construindo um mundo de objetos. Isto sugere que um conhecimento anterior é útil para uma melhor interpretação e entendimento da imagem: ter uma clara idéia de o que olhar, onde olhar e como olhar (Hoffman 1991).

O olho e a visão são sistemas muito complexos e sofisticados, envolvendo processos fisiológicos, bioquímicos, neurológicos, psicológicos, etc. . Alguns aspectos elementares dos olhos e da visão são necessários para um melhor entendimento do processo de cromostereoscopia. O olho tem dois tipos de receptores: os cones e os bastões. Os cones estão altamente concentrados na fovea e estão um a um diretamente conectados com as células do nervo bipolar. Os bastões estão espalhados na periferia da retina em conexão com os cones, mas sem apresentar uma conexão um a um com as células nervosas. Assim, a acuidade visual é menos precisa quando utiliza-se dos bastões. Os cones, que são maiores, são usados principalmente para uma acuidade detalhada em condições de luminosidade alta, e também são responsáveis pela acuidade de cor. Os bastões, que são menores e cerca de 18 vezes mais numerosos, são utilizados em condições de luminosidade reduzida, mas permitem somente a acuidade visual em branco & preto.

VISÃO COLORIDA É muito comum descrever coisas do cotidiano pelas cores características de feições que nos são familiares: o azul do céu, o verde da grama, o vermelho do fogo, etc. Mais cientificamente, a teoria da cor iniciou-se com Isaac Newton, que articulou os problemas fundamentais, que ainda hoje desafiam os estudiosos. Em 1704 ele descreveu experimentos que revelaram intrigantes propriedades das cores: usando um prisma ele separou a luz do sol em um espectro de cores. As luzes de diferentes

comprimentos de onda são refratadas em diferentes graus quando passam de um meio (ar) para outro (prisma de cristal). Ele distinguiu sete cores: violeta, índigo (anil), azul, verde amarelo, laranja e vermelho. Estas regiões representam amplos intervalos de comprimento de ondas (Figura 1). Assim, os limites do espectro visual estão entre 4.000 e 7.600 angstroms (Å).

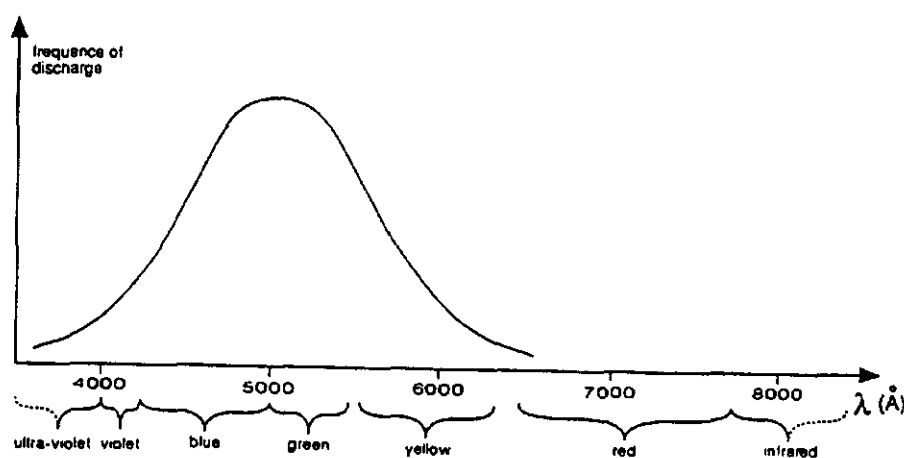


Figura 1: Curva teórica de resposta do olho humano (de H. Dawson, *Physiology of the Eye*).

Uma cor pode envolver variações no matiz (cromaticidade), na intensidade (brilho) e na saturação (pureza) separadamente, ou ela pode envolver mais do que um desses componentes. Dentro de certas regiões do espectro, é possível distinguir variações sutis de matiz de até 5 a 10 Å. Com prática, o homem pode distinguir 120 ou mais matizes, quando a intensidade e a saturação são constantes, porém muito mais se a intensidade e a saturação variarem (Hanes & Rhoades 1959).

PERCEPÇÃO DE PROFUNDIDADE A percepção refere-se ao processo através do qual a estimulação sensorial é traduzida em uma experiência organizada. No contexto da “profundidade”, o sistema visual (o processo) cria o mundo tridimensional (o preceito) a partir de um padrão bidimensional projetado sobre as retinas (a estimulação). Porém, o fato de que podemos ter a noção de profundidade ainda que com um dos olhos fechados, ou em

uma fotografia ou pintura, indica que os dois olhos não são condição necessária para se obter a sensação de profundidade. Esta dicotomia sugere uma relação íntima entre o que poderia ser chamado de “reconhecimento do objeto” e a percepção tridimensional. Infelizmente, pouco se sabe como o cérebro identifica objetos, o que não permite que muitos dos aspectos da percepção de profundidade sejam entendidos (Friedhoff & Benzon 1991). Na moderna psicologia, no entanto, aceita-se que a percepção de profundidade é baseada, principalmente, em cerca de dez indicadores (Braunstein 1976). Esses indicadores são considerados pedaços de informação, os quais, quando adicionados a uma figura plana tornam a percepção de profundidade possível.

Esses dez indicadores podem ser classificados em dois grupos principais: quatro fisiológicos e seis psicológicos, obtidos da imagem retinal (Okoshi 1976). Os indicadores fisiológicos são: acomodação, convergência, disparidade binocular e paralaxe de movimento. A acomodação (focalização de acordo com a distância) e a convergência (movimento do globo ocular) são associadas com as atividades musculares dos olhos, e são importantes para a percepção de profundidade somente para distâncias menores do que nove metros.

A disparidade binocular é relacionada as imagens sutilmente diferentes de um determinado objeto, formadas nas retinas de cada um dos dois olhos do observador. O grau de disparidade entre as duas imagens retinais, a assim chamada paralaxe binocular, depende da diferença entre os ângulos nos quais um objeto é observado pelo olho direito e pelo olho esquerdo. Para observações à distâncias médias este indicador é o mais importante na percepção de profundidade. Já, para observações à distâncias maiores, a diferença entre as duas imagens retinais diminui resultando na redução da percepção de profundidade.

Com a paralaxe de movimento visual, as indicações de distância são obtidas das mudanças retinais, as quais dependem da interposição de objetos no espaço: a razão na qual a projeção de um objeto move-se através da retina varia com a distância do objeto. Este indicador é especialmente significativo quando o observador, ou o objeto, move-se rapidamente.

Os seis indicadores psicológicos que podem dar sensação de profundidade a partir de imagens planas reproduzidas sobre as retinas são: tamanho da imagem retinal, perspectiva linear e em área, superposição, nuances de sombra (“shade and shadows”) e gradiente de textura. Esses indicadores podem estar combinados juntos para realçar a sensação de profundidade. No sensoriamento remoto, a perspectiva é, geralmente o indicador mais útil. Nas imagens de radar, as nuances de sombra são os indicadores mais importantes para a sensação de profundidade. Mais detalhes sobre esses indicadores podem ser encontrados em Braunstein (1976) e Okoshi (1976).

CONCEITO DE CROMOESTEREOSCOPIA O conceito de cromoestereoscopia é baseado na teoria de Einthoven (1885). A cromoestereoscopia é um fenômeno no qual estímulos coloridos coplanares são percebidos como diferentes profundidades aparente. A cromoestereoscopia (“chromostereopsis”) é positiva se a cor vermelha é percebida em uma posição mais próxima do que a azul, e negativa quando ocorre o inverso. Einthoven (1885) creditou este fenômeno à dispersão cromática transversal e a relação assimétrica dos eixos visual e óptico.

Usando-se as propriedades físicas da refração é possível, portanto, realçar a “chromostereopsis”. Um raio de luz ao passar por um vidro (mudança de meio ar - vidro) sofre uma refração, cujo valor depende das suas velocidades no ar e no vidro, as duas velocidades dependendo do comprimento de onda da luz. Por exemplo, ao atravessar um prisma de vidro, as diferentes refrações dos vários comprimentos de onda de uma luz branca irão espalhá-los de forma que cada um seja visto como uma banda de luz colorida.

A técnica 3D descrita aqui é baseada no equipamento e processo denominados de ChromaDepth™ 3D, desenvolvido por Steenblik (1986, 1991), usando os dois fenômenos descritos anteriormente. O conceito básico, portanto, é o seguinte: as diferentes profundidades são codificadas em uma imagem através de diferentes cores e, então, as cores são decodificadas através da óptica, produzindo a percepção de profundidade.

Os primeiros óculos criados com prismas (plástico, vidro, Fresnel) e líquidos ópticos funcionaram perfeitamente, porem não permitiam a sua produção em massa.

Posteriormente, os óculos utilizaram-se de ópticas especiais com o objetivo de desenvolver lentes difrativas muito delgadas, que tenham a eficiência em óptica refrativa, e que ajam como espessos prismas de vidro. Atualmente, essas lentes incorporam um sistema de micro-óptica de alta precisão, resultando em óculos completamente transparentes.

Cada cor é, portanto, desviada diferentemente gerando uma paralaxe angular diferencial, devido a dependência do índice refrativo em relação ao comprimento de onda. Óculos com um único prisma, no entanto, provocam a curvatura de todas as cores provenientes do objeto, causando, desse modo, que a imagem do objeto pareça estar muito mais próxima do observador do que a sua distância real (Figura 2a). Isso causa dois principais problemas na visão (Steenblik 1986, 1991):

- A focalização na distância real do objeto causa forte esforço dos olhos, porque eles estão sendo focalizados à uma distância que é diferente daquela do ponto focal determinada pelo cérebro, baseado na paralaxe dos olhos.
- Se o observador move a sua cabeça enquanto observa o objeto, a imagem do objeto move-se diferentemente da expectativa do cérebro do observador, causando uma desorientação visual ou vertigem. Isto acontece porque o cérebro acredita que o objeto está mais próximo do que na realidade está.

A solução são os óculos de duplo prisma que aumentam a distância das imagens para coincidir com a distância real do objeto (Figura 2b). Os prismas (um de baixa e outro de alta dispersão) são construídos de modo que toda a luz amarela passe pelos dois prismas sem sofrer nenhum deslocamento. As outras cores são deslocadas com um ângulo de desvio significativo, devido ao prisma de alta dispersão: as imagens vermelhas aparecerão em posição anterior ao objeto e as azuis em posição posterior.

Por serem os olhos os sensores e os óculos construídos com prismas normais de vidros que refratam integralmente a luz, as características fisiológicas dos olhos no espectro visível definem o intervalo espectral, o poder de resolução espectral e a resolução espacial do processo. Além disso, o processo todo constitui-se em uma ferramenta para a percepção qualitativa de profundidade, sendo que os valores quantitativos de profundidade podem ser

obtidos diretamente dos dados codificados para os matizes (hue) na geração da imagem cromoestereoscópica.

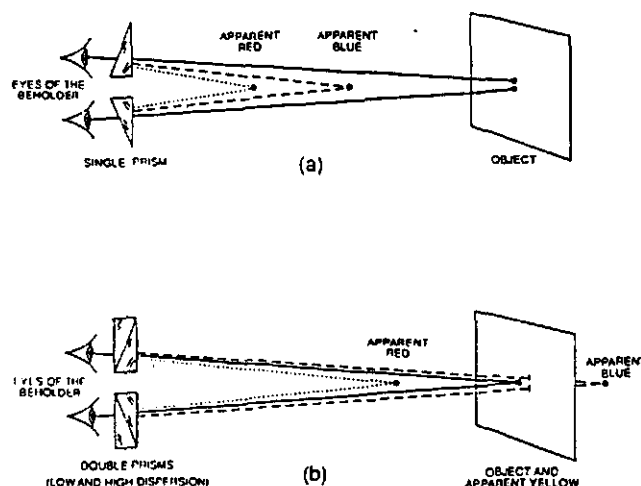


Figura 2: Diferentes configurações para os óculos ChromaDepth™: (a) prisma único e, (b) prisma duplo (modificado de Steenblik 1991)

Devido ao fato que, a informação de profundidade é sinteticamente codificada na cor, tanto temas quantitativos como qualitativos podem ser usados no processo. No caso da informação quantitativa, a cor corresponde ao valor de alguma variável escalar quantitativa (p. ex., elevação, gravimetria, etc.). Na codificação da informação qualitativa (p. ex., dados de polígonos, vetores, etc.), um conjunto de cores (diferindo em matiz) é associado em correspondência com características particulares do símbolo (p. ex., tipo de polígono, tipo de vetor, etc.).

CROMOESTEREOSCOPIA APLICADA AO SENSORIAMENTO REMOTO Por que usar imagens cromoestereoscópicas em sensoriamento remoto ? No processo de sensoriamento remoto, após os estágios de aquisição e comunicação, há o estágio da interpretação, o qual envolve não somente o processamento de dados e a visualização, mas também a percepção e interpretação feitas pelo homem (Hoffman 1990).

Independentemente do nível de processamento automático dos dados para a obtenção da informação, o último estágio necessita de seus próprios sistemas e ferramentas para que o intérprete possa fazer o seu julgamento e tomar as suas decisões sobre o objeto em estudo.

A cor e a percepção estéreo são, portanto, as duas principais características da visão humana:

- Para a visão colorida, tem sido demonstrado que a cor pode transmitir informações sobre dados multi-dimensionais (Ware & Beatty 1988), e que a cor pode ajudar significativamente o observador na percepção e julgamento sobre a informação (Judd & Eastman 1971).
- Para a percepção de profundidade, tem sido mostrado que a interpretação de informações cartográficas pode ser facilitada pelo uso de representações em 3D ou em perspectiva, quando comparadas com imagens 2D (Bemis *et al.* 1988).

A cromoestereoscopia é uma importante ferramenta para auxiliar o intérprete no entendimento das imagens de sensoriamento remoto e na percepção e extração de informações biofísicas e geofísicas. Para gerar uma imagem cromoestereoscópica de qualidade, a partir de dados multi-fontes que possam ser “percebidos” através de óculos, são necessárias, entretanto, duas etapas separadas de processamento (geométrico e radiométrico). Esses processamentos são necessários para garantir que a imagem cromoestereoscópica preserve a integridade geométrica e o detalhe radiométrico das imagens de entrada, em tons de cinza.

ETAPA DE PROCESSAMENTO GEOMÉTRICO Dois modelos de correção geométrica completamente diferentes são utilizados, neste trabalho, para avaliar os seus efeitos nas imagens cromoestereoscópicas obtidas: uma transformação polinomial de segunda ordem e um modelo de geometria fotogramétrica desenvolvida pelo Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (CCRS).

O modelo fotogramétrico é baseado na condição de colinearidade, e representa as realidades físicas de toda a geometria de observação. Ele é integrado porque a equação final leva em consideração as diferentes distorções relativas à plataforma, ao sensor, à Terra e à

projeção cartográfica. Ele é unificado porque está adaptado para processar, indiscriminadamente, dados de satélite ou de aeronave, e dados ópticos (VIR) ou SAR (Toutin 1995a). Sua superioridade deve-se, principalmente, ao fato de que o modelo respeita a geometria de observação, incluindo o relevo, e, portanto, corrige globalmente a imagem. Por outro lado, o método polinomial minimiza somente os resíduos dos GCP's (correções locais), sem identificar a fonte dos erros. Comparações qualitativas e quantitativas entre esses dois métodos de correção geométrica foram apresentadas em Toutin (1995b). A pesquisa mostrou que as transformações polinomiais geram artefatos e informações errôneas, devido a mistura de pixels no co-registro dos dados de entrada.

O autor avalia os dois métodos de correção geométrica em uma área próxima ao Lago Okanagan nas Montanhas Rochosas, British Columbia, Canadá. A área é caracterizada por grandes variações de relevo (variação de 1600 metros em altitude). Os dados utilizados foram: uma imagem TM Landsat, uma imagem SAR ERS-1 e um DEM com grade de 30 metros, gerado a partir de linhas de contorno de 10 metros de um mapa na escala de 1: 50.000. São avaliados os efeitos dessas correções geométricas na qualidade da estéreo visão com os óculos ChromaDepth™.

Sem os óculos, a imagem obtida pelo método polinomial é pouco nítida e apresenta problemas de co-registro devido a mistura de pixels. Estes problemas não são observados na imagem obtida pelo método fotogramétrico. Com os óculos ChromaDepth™, as duas imagens permitem a percepção de profundidade, porém a obtida pelo método polinomial é menos nítida e com menor detalhe de percepção tridimensional. Em algumas áreas os artefatos gerados pela mistura de pixels diminui a nitidez e quase impede a percepção de profundidade nessa imagem.

ETAPA DE PROCESSAMENTO RADIOMÉTRICO Na transformação IHS pode-se, independentemente, controlar e variar os parâmetros de processamento (principalmente o LUT) para cada componente (I, H, S) e observar qual é o seu efeito na imagem cromostereoscópica e na percepção de profundidade. De uma maneira simplificada, o processamento radiométrico deve: comprimir o LUT do canal intensidade (I), reduzir o

canal matiz (H) para usar apenas os valores que estão no intervalo que vai do azul ao vermelho e, utilizar valores médios no canal saturação (S).

CONCLUSÕES Este artigo apresenta uma ferramenta nova e complementar para a visualização e interpretação de dados multifonte. Ela combina aspectos fisiológicos e psicológicos dos processos de percepção de profundidade e da cor, que são as principais características da visão humana. No processo que usa o efeito conhecido como cromoestereoscopia, a profundidade é codificada em uma imagem por meio das cores e, posteriormente, essas cores são decodificadas por meio da óptica refrativa de um duplo prisma, os óculos ChromaDepth™, produzindo a percepção de profundidade. Como a percepção de profundidade é gerada “sinteticamente”, quaisquer temas, tais como, dados de altimetria, gravimetria, polígonos, etc. podem ser usados na cromoestereoscopia. O resultado é uma imagem plana comum, colorida, que pode ser analisada normalmente sem nenhum equipamento, mas que permite a percepção tridimensional com o auxílio dos óculos que utilizam a óptica de refração.

Aplicada aos dados de sensoriamento remoto, a imagem cromoestereoscópica é gerada em duas etapas:

- 1- Correção geométrica precisa: a precisão é essencial porque outras correções geométricas, tais como as transformações polinomiais, podem causar forte diminuição na nitidez da imagem cromoestereoscópica e na sua capacidade de percepção de profundidade, devido a mistura de pixels;
- 2- Integração radiométrica utilizando a transformação IHS, na qual o tema usado para gerar a profundidade é associado ao canal matiz (H). As outras imagens orto-retificadas são associadas aos canais intensidade (I) e saturação (S) para fornecer a textura e realçar a interpretabilidade.

Uma compressão do LUT do canal intensidade resulta em uma imagem cromoestereoscópica que é mais escura e com variações mais bruscas, produzindo uma percepção de profundidade mais realística em áreas onde ocorrem grandes variações de intensidade. Segundo o autor, em uma escala de 8 bits, um valor em torno de 200 mostrou-

se apropriado para os diversos conjuntos de dados analisados. Da mesma forma, um corte nos valores de LUT (cerca de 200 a 210) do canal matiz (H) permite o uso somente das cores que vão do azul ao vermelho. A cor violeta não é usada devido a sua confusão psicológica com o azul. Finalmente, se no canal saturação não for usada uma imagem, a aplicação de um valor constante entre 100 e 150 resulta em um bom equilíbrio entre as percepções de profundidade e de conteúdo radiométrico na imagem final.

Demonstrou-se que um bom entendimento da visão colorida e da percepção de profundidade é essencial, para que se possa exercer um controle detalhado nos parâmetros de processamento da cromoestereoscopia, com o objetivo de controlar a existência de potenciais artefatos e para obter uma melhor percepção de profundidade. Dependendo da aplicação, o usuário pode, voluntariamente, modificar um artefato através dos parâmetros de processamento para realçar algumas feições específicas, desde que tenha conhecimento *a priori* do terreno, do conjunto de dados, do método e de sua aplicabilidade.

REFERÊNCIAS

- Bemis S.V., Leeds J.L., Winer E.A. 1988. Operator Performance as a Function of Type of Display: Conventional Versus Perspective. *Human Factors*, 30: 162-169.
- Benson S.A., Duston-Roberge D.A., Simard R. 1985. A Chromatic Holographic Stereogram of Landsat MSS Data. *Optical Engineering*, 24(2): 338-340.
- Braunstein M.L. 1976. *Depth Perception through Motion*. Academic Press, New York, 206p.
- Einhoven W. 1885. Stereoskopie durch Farbendifferenz. *Albrecht von Graef's Archiv fur Ophthamologie*, 31: 211-238.
- Friedhoff R.M. & Benzon W. 1991. *The Second Computer Revolution: Visualization*. W.H. Freeman Company, New York, 214p.
- Gabor D. 1948. A New Microscopic Principle. *Nature*, (161): 777-779.
- Hanes R.M. & Rhoades M.V. 1959. Color Identification as a Result of Extended Practice. *Journal of Optical Society of America*, 49: 1060-1064.

- Hoffman R.R. 1990. Remote Perceiving: A Step Toward a Unified Science of Remote Sensing. *Geocarto International*, 5(2): 3-13.
- Hoffman R.R. 1991. Human Factors Psychology in the Support of Forecasting: the Design of Advanced Meteorological Workstations. *Weather and Forecasting*, 6: 98-110.
- Judd D.B. & Eastman A. 1971. Prediction of Target Visibility from the Colors of Target and Surround. *Illumination Engineering*, 66: 256-266.
- Okoshi T. 1976. *Three-Dimensional Imaging Techniques*. Academic Press. New York, 403p.
- Steenblik R.A. 1986, 1991. *Stereoscopic Process and Apparatus Using Different Deviations of Different Colors*. U.S. Patents No. 4-597-634 and 5-002-364.
- Toutin T. 1995a. Multisource Data Fusion with an Integrated and Unified Geometric Modelling. *EARSel Journal "Advances in Remote Sensing"*, 4(2): 118-129.
- Toutin T. 1995b. Intégration de données multi-sources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, 16(15): 2795-2811.
- Toutin T. 1997. Qualitative aspects of chromo-stereoscopy for depth perception. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63(2): 193-203.
- Toutin T. & Rivard B. 1995. A New Tool for Depth Perception of Multi-Source Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(10): 1209-1211.
- Ware C. & Beatty J.C. 1988. Using Colors Dimensions to Display Data Dimensions. *Human Factors*, 30: 127-142.

CAPÍTULO V

A abordagem textural de radar na geologia

INTRODUÇÃO. A textura é um importante elemento usado em interpretação visual de imagens. Ela reflete o padrão espacial ou a frequência de variação de tons em uma determinada área, produzida por uma associação de feições pequenas demais para serem identificadas individualmente, mas que permitem a identificação e a delimitação de áreas com propriedades superficiais específicas (Simonett e Davis, 1983).

Existem duas fontes de textura em uma imagem SAR: a textura proveniente da cena e a relacionada com o *speckle*. A primeira é a variação em tons devido a mudanças na reflectividade média local na cena. O *speckle* é o componente de textura da imagem (não da cena imageada), causado pela natureza coerente da energia do radar e pelo sistema de processamento (Raney, 1998). De um modo geral, numa análise visual, a presença de *speckle* dificulta o reconhecimento de similaridades e diferenças tonais e texturais entre áreas adjacentes. Em análise digital, que utiliza técnicas de diferenciação baseadas na associação de valores digitais de *pixels*, o *speckle* pode acarretar resultados irreais. Por outro lado, a atenuação deste ruído pode comprometer a informação textural contida na cena, causando perda de informação.

A utilização da textura em imagens SAR pode ser vista em aplicações para discriminação de diversos tipos de cultura em regiões agrícolas e diferentes tipos de florestas. Isto pode ser constatado em trabalhos como Ulaby et al. (1986), Yanasse et al. (1993), Anys e He (1995), Rennó (1995), Soares et al. (1997). Novo et al. (1998) utilizam a textura para caracterização de ambientes aquáticos no reservatório de Tucuruí (PA), através de uma análise temporal com três imagens RADARSAT-1 com datas diferentes. Soler (2000, comunicação pessoal), em uma nova abordagem de classificação textural em imagens RADARSAT-1, verifica o potencial dos atributos texturais na diferenciação entre manchas de óleo e água de superfície oceânica.

Além destas aplicações, a textura também pode ser utilizada em mapeamentos geológicos para identificação e diferenciação de unidades litológicas (Trevett, 1986 , Shao et al. 1994, Bignelli, 1995).

Azzibrouck et al. (1997), em trabalho com dados do RADARSAT, consegue associar informações texturais com diferentes unidades litológicas numa área com potencial mineral importante, com ocorrências de Mn e Au, caracterizada por densa cobertura vegetal, típica de floresta equatorial úmida.

Pedroso (1998) utiliza os descritores texturais obtidos de imagem JERS no mapeamento de mineralizações tipo *placers* na região de Tapajós (PA) e comprova a relação entre diferentes classes texturais, relacionadas a aspectos geológicos e geomorfológicos da área estudada.

Morais (1998) utiliza medidas de textura em imagens SAR aerotransportadas (SAREX'92) e orbital (RADARSAT-1), no mapeamento de lateritas mineralizadas em ferro no Depósito de N1 (Carajás – PA). A avaliação preliminar dos resultados mostra que as respostas na banda C (especialmente HH e VV para os dados do SAREX'92) são sensíveis ao contraste geobotânico, ao exibir padrões tonais/texturais ligados às variações da associação laterita/vegetação.

FUNDAMENTAÇÃO. Feições espectrais, texturais, temporais e contextuais são os quatro elementos importantes de padrões usados na interpretação visual de imagens de sensoriamento remoto, e geralmente em imagens de radar. Feições espectrais descrevem as variações tonais médias banda a banda numa imagem multiespectral, enquanto que feições texturais descrevem a distribuição espacial dos valores tonais numa banda. Feições contextuais contêm informações sobre o arranjo relativo de segmentos grandes pertencentes a diferentes categorias e feições temporais descrevem mudanças nos atributos da imagem em função do tempo (Frost et al., 1984).

A textura constitui uma característica importante em análises de diversos tipos de imagens, desde aquelas obtidas de *scanners* multiespectrais através de aeronaves ou satélites (com aplicação em sensoriamento remoto), até imagens de culturas de células ou amostras de tecido (com aplicação na área de biomédicas). Embora os métodos de análise de textura sejam muito utilizados, não há uma apresentação formal e nem uma definição precisa do termo. As técnicas de discriminação de textura desenvolvidas se aplicam para este propósito, já que os métodos de caracterização da textura encontrados na literatura são baseados na intuição e percepção de cada autor (Haralick, 1979).

Na área de sensoriamento remoto, a textura é considerada um elemento importante usado em interpretação visual de imagens. Em análises visuais, a textura refere-se ao padrão aparente de uma determinada área, descrita pelas características lisa, fina, rugosa e grossa. Em análises digitais, ela reflete o padrão espacial ou a frequência de variação de tons em uma determinada área, produzida por uma associação de feições pequenas demais para serem identificadas individualmente, mas que permitem a identificação e a delimitação de áreas com propriedades superficiais específicas (Simonett e Davis, 1983). Além disso, a textura contém informações importantes sobre o arranjo estrutural das superfícies e o ambiente que as circunda, ou seja, a informação contextual da área analisada (Haralick et al. 1973).

A textura está intrinsecamente ligada a tonalidade e, em determinadas circunstâncias uma pode dominar a outra. Esta relação pode ser entendida da seguinte forma: quando uma área pequena de uma imagem tem pouca variação de níveis de cinza, a propriedade dominante é a tonalidade, caso contrário, a propriedade dominante é a textura (Haralick et al., 1973 e Haralick, 1979).

Um aspecto importante a ser considerado em análises texturais é a resolução espacial do sensor. Quando esta é menor que os alvos de interesse contidos na cena, a maioria das medidas (números digitais) da imagem são altamente correlacionadas com as de sua vizinhança. No entanto, se o tamanho dos objetos se aproxima da resolução

espacial do sensor, há uma diminuição das semelhanças entre medidas vizinhas. E quando a resolução espacial do sensor diminui, vários objetos podem ser encontrados num único *pixel*, tornando as medidas uniformes (Woodcock et al., 1987). Assim, a textura observada na banda pancromática do sensor HRV-SPOT, com resolução espacial de 10m, não é distinguida numa imagem do sensor AVHRR-NOAA, com resolução espacial de 1,1Km (Mather, 1987).

Além da variação tonal e da resolução espacial, análises de textura em imagens de radar estão fortemente condicionadas à resolução radiométrica do sensor. Se as resoluções radiométrica e espacial são degradadas, a separabilidade entre as classes também se degrada com a textura (Frost et al.1984).

MÉTODOS DE ANÁLISE DE TEXTURA. Na tentativa de quantificar a textura, muitos autores têm desenvolvido métodos de processamento de imagens para análise de textura, cuja maioria deles é baseada na distribuição espacial dos níveis de cinza de um segmento de uma imagem. Estes métodos podem ser classificados nas categorias estatística e estrutural. Na abordagem estatística, a informação textural é representada pela propriedade estatística da distribuição espacial dos níveis de cinza. Na abordagem estrutural, que não é muito utilizada, a textura é um conjunto de subpadrões espaciais na imagem com arranjos espaciais repetitivos regulares (Haralick, 1979).

A abordagem estatística é freqüentemente usada para análises de textura de imagens de sensoriamento remoto, devido ao fato de que as imagens possuem texturas estocásticas e a textura é mais facilmente modelada. Este enfoque abrange funções de autocorrelação, transformações ópticas, transformações digitais (medidas de primeira ordem), quantificação de textura na borda de elementos estruturais, probabilidades de co-ocorrência dos níveis de cinza (medidas de segunda ordem) e modelos autoregressivos. Estas técnicas são descritas com detalhes em Haralick (1979).

Além desses, outros métodos surgidos recentemente são o semivariograma descrito em Curram (1988), Miranda et al. (1996), a unidade e o espectro textural proposto por Wang e He (1990), o filtro Gabor (Khazenie e Richardson, 1992) e os modelos de campos aleatórios markovianos (Chellappa e Jain, 1993).

MEDIDAS DE PRIMEIRA ORDEM. Métodos que utilizam parâmetros estatísticos de primeira ordem para a caracterização de textura têm sido desenvolvidos e utilizados por vários autores (Irons e Petersen, 1981, Yanasse et al. 1993). A transformação textural baseada em estatística de primeira ordem descrita em Hsu (1978), é obtida de fotografias aéreas digitalizadas com propriedades locais específicas. Considerando uma janela móvel com o *pixel* central circundado por *pixels* adjacentes, as medidas da distribuição do níveis de cinza, média e variância, são atribuídas ao *pixel* central na janela. Como esta se move para o lado na imagem usando cada *pixel* como ponto central, a cada posição, valores discretos são atribuídos a conjuntos de *pixels* adjacentes formando as transformações texturais.

Seja uma imagem de um conjunto multiespectral, onde $I(i, j, \lambda)$ representa o nível de cinza para um canal espectral λ localizado na posição referente à coluna i e à linha j de uma imagem. A transformação textural constrói um canal adicional k , cujo valor $I(i, j, k)$ caracteriza do mesmo modo a distribuição espacial ou variação do níveis de cinza ao redor do pixel (i, j) da imagem original. O novo canal está relacionado à transformação textural da imagem I (Haralick, 1979).

Hsu (1978) especifica 17 propriedades locais, que incluem os quatro momentos centrais (média, desvio padrão, assimetria e curtose) dos níveis de cinza no interior da janela e diferenças entre níveis de cinza médios e *pixels* vizinhos mais próximos. As medidas de textura de primeira ordem podem ser aplicadas para classificações de imagens digitais (Briand e Gray, 1989).

Das 17 medidas definidas por Hsu (1978), duas são as mais utilizadas e suas respectivas fórmulas e descrições teóricas são descritas a seguir:

a) *Média*

$$Med_{\lambda} = \sum_i \sum_j \frac{I(i, j, \lambda)}{N}$$

onde N é o número de elementos da janela

Esta medida avalia a tendência central dos valores dos níveis de cinza distribuídos na imagem.

b) *Desvio Padrão*

$$Desp_{\lambda} = \sqrt{\sum_i \sum_j \frac{[I(i, j, \lambda) - Med_{\lambda}]^2}{N - 1}}$$

Este parâmetro é dependente da média e mede a dispersão dos valores dos *pixels* em relação à média.

MEDIDAS DE SEGUNDA ORDEM. Enquanto que as medidas de primeira ordem descrevem a distribuição dos níveis de cinza de uma região da imagem, as medidas de segunda ordem, além de descreverem a distribuição, apresentam a relação espacial entre os *pixels*. O método mais utilizado em análises deste tipo de medida, proposto por Haralick et al. (1973), utiliza estatísticas da matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza (MCNC) de uma imagem. Cada elemento $P(i, j)_{\Delta x, \Delta y}$ da matriz de co-ocorrência representa a frequência com que um *pixel* com nível de cinza i e outro com nível de cinza j ocorrem na imagem I separados por uma distância de Δx colunas e Δy linhas.

Esta abordagem é baseada na suposição de que a informação textural está contida na relação espacial média ou global dos níveis de cinza da imagem. A

informação textural pode ser especificada usando matrizes de dependência espacial dos níveis de cinza computados em vários ângulos (0^0 , 45^0 , 90^0 e 135^0) e distâncias.

Seja uma imagem retangular com N_x *pixels* na direção horizontal, N_y *pixels* na direção vertical e a quantização espectral em N_g níveis de cinza; denomina-se $L_x = \{1, 2, \dots, N_x\}$ o domínio espacial horizontal, $L_y = \{1, 2, \dots, N_y\}$, o domínio espacial vertical e $G = \{1, 2, \dots, N_g\}$ o conjunto de N_g níveis de cinza quantizados. $L_y \times L_x$ é o conjunto de *pixels* da imagem ordenado pela linha e pela coluna designada. A imagem I pode ser representada como uma função que designa um nível de cinza no G para cada *pixel*. Sua informação textural é caracterizada pela matriz de freqüência relativa $p(i, j, d, \theta)$, cujos dois *pixels*, um com nível de cinza i e outro com j são separados pela distância d e por uma relação angular θ na imagem (Figura 1). A matriz de freqüência de dependência espacial de níveis de cinza é uma função da relação angular e da relação de distância entre os dois *pixels*.

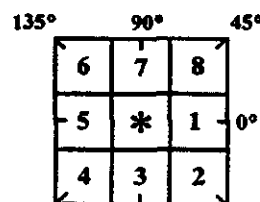


Fig.1 – Exemplo de posicionamento de *pixels* com janela 3×3 .

As células 1 e 5 são vizinhas com 0^0 em relação à célula central, 2 e 6, vizinhas com 135^0 ; 3 e 7, vizinhas com 90^0 e 4 e 8 vizinhas com 45^0 em relação à célula central. FONTE: Haralick et al. (1973, p.612).

Na Figura 2, tem-se um exemplo de construção de uma matriz de co-ocorrência numérica com 4×4 *pixels*, 4 níveis de cinza (0 a 3) e a distância $d = 1$. O número de vezes que os níveis de cinza i e j são vizinhos é indicado por $\#(i, j)$. Tomando como exemplo o elemento (3, 1) na matriz de co-ocorrência (c), cujo vetor deslocamento é $d = (1, 0)$ com $\theta = 0^0$, o valor 0 (zero) indica que o valor 3 não ocorre como vizinho do valor 1, na imagem numérica (a). Esta matriz de co-ocorrência é então normalizada, com a divisão pela somatória dessa matriz, obtendo-se a MCNC.

				Nível de cinza				
				0	1	2	3	
0	0	1	1	0	#(0,0)	#(0,1)	#(0,2)	#(0,3)
0	0	1	1	1	#(1,0)	#(1,1)	#(1,2)	#(1,3)
0	2	2	2	2	#(2,0)	#(2,1)	#(2,2)	#(2,3)
2	2	3	3	3	#(3,0)	#(3,1)	#(3,2)	#(3,3)

(a)

(b)

4	2	1	0	6	0	2	0
2	4	0	0	0	4	2	0
1	0	6	1	2	2	2	2
0	0	1	2	0	0	2	0

(c) P0°

(d) P90°

2	1	3	0	4	1	0	0
1	2	1	0	1	2	2	0
3	1	0	2	0	2	4	1
0	0	2	0	0	0	1	0

(e) P135°

(f) P45°

Fig. 2 – Matrizes de co-ocorrência de uma imagem numérica de 4 × 4 *pixels* com 4 níveis de cinza (0 a 3), onde: (a) imagem numérica, (b) forma padrão da matriz de co-ocorrência para uma imagem com níveis de cinza de 0 a 3. (c), (d), (e) e (f) representam as quatro matrizes com a distância *d* e as orientações de 0°, 90°, 135° e 45°, respectivamente.

FONTE: Haralick et al. (1973, p.613).

Embora as medidas de textura derivadas da MCNC sejam bastante utilizadas e sua eficiência comprovada em trabalhos anteriores; Shanmugan et al. (1981), Ulaby et al. (1986), Baraldi & Parmiggiani (1995); a principal desvantagem no uso desta técnica é a grande demanda de memória e tempo computacionais. Para uma imagem de 8 bits (256 níveis de cinza), por exemplo, a matriz de co-ocorrência é composta por 65536 elementos, com muitos valores nulos. A possibilidade de trabalhar com vetores diferença dos níveis de cinza é uma boa alternativa (Weska et al., 1976; Welch et al., 1990). Assim, para imagens com 8 bits, o vetor diferença possui 256 elementos e cada elemento é definido por:

$$P^D(l)_{\Delta x, \Delta y} = \sum_i \sum_j P(i, j)_{\Delta x, \Delta y} \forall |i - j| = l$$

onde:

$P^D(l)$: elemento do vetor diferença para a imagem l para uma distância de Δ_x colunas e Δ_y linhas :

$P(i,j)_{\Delta_x,\Delta_y}$: elemento da matriz de co-ocorrência para um nível de cinza i e outro nível de cinza j da imagem l separados por uma distância de Δ_x colunas e Δ_y linhas.

Haralick et al. (1973) propõem 14 medidas de textura baseadas na MCNC. Cada medida derivada desta matriz pode ser usada para criar uma nova imagem de textura, que pode ser incorporada à informação espectral dos dados de satélite, em classificação digital de imagens de sensoriamento remoto. Destas medidas, as mais utilizadas são descritas a seguir:

a) *Energia*:

$$Ene_{\Delta_x,\Delta_y} = \sum_i \sum_j P(i,j)^2_{\Delta_x,\Delta_y}$$

Também chamado Momento Angular de Segunda Ordem em Haralick et al. (1973), esta medida avalia a uniformidade textural, isto é, a repetição de pares de níveis de cinza. Quando a imagem é homogênea (apenas *pixels* com valores de níveis de cinza muito próximos estão presentes) ou quando a textura é uniforme, poucos (possivelmente apenas um) elementos da MCNC são diferentes de zero e a energia alcança valores próximos ao máximo igual a um. Assim, valores de energia altos ocorrem quando a distribuição dos níveis de cinza numa janela é periódica ou constante.

b) *Entropia*:

$$Ent_{\Delta_x,\Delta_y} = -\sum_i \sum_j P(i,j)_{\Delta_x,\Delta_y} \log P(i,j)_{\Delta_x,\Delta_y}$$

Este parâmetro mede a desordem de uma imagem. Quando a imagem não apresenta textura uniforme, muitos elementos da MCNC têm valores muito pequenos. Conceitualmente, a entropia está relacionada à energia da MCNC através de uma correlação linear negativa.

c) *Homogeneidade*:

$$Hom_{\Delta x, \Delta y} = \sum_i \sum_j \frac{P(i, j)_{\Delta x, \Delta y}}{1 + (i - j)^2}$$

Este parâmetro, também chamado de Momento da Diferença Inversa em Baraldi e Parmiggiani (1995), mede a homogeneidade da imagem e assume valores grandes para diferenças de tons de cinza pequenas nos pares de elementos.

d) *Dissimilaridade*:

$$Dis_{\Delta x, \Delta y} = \sum_i \sum_j |i - j| P(i, j)_{\Delta x, \Delta y}$$

A dissimilaridade mede o quanto os elementos são diferentes entre si e assume o maior valor quando a diferença entre eles é grande.

EXEMPLOS DE APLICAÇÕES DE MEDIDAS DE PRIMEIRA E SEGUNDA ORDEM EM IMAGENS SAR. As técnicas de análise de textura baseadas em estatísticas de primeira e segunda ordem (MCNC) são muito utilizadas em diversas áreas das geociências, especialmente na caracterização do uso do solo e na discriminação de tipos distintos de florestas. Muitos autores utilizam combinações de várias medidas, buscando melhores resultados nos processos de classificação. As medidas de textura não necessariamente fazem suposições sobre a distribuição estatística dos dados e sendo assim, podem ser aplicadas tanto em imagens de radar quanto em imagens ópticas sem restrições (Soares et al., 1997). Alguns exemplos de trabalhos que utilizaram técnicas de análise textural em imagens SAR baseadas em medidas de primeira e segunda ordem são descritos a seguir.

Shanmugan et al. (1981) conseguiram discriminar quatro unidades litológicas através das informações texturais extraídas de dados SAR SEASAT. Utilizando

medidas derivadas da MCNC, os autores mostraram o potencial de discriminação para alvos geológicos, especialmente em imagens que apresentem boas resoluções espaciais.

Frost et al. (1984) trabalharam com medidas derivadas da matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza em imagens de radar SEASAT (banda L - 23,5cm) numa abordagem geológica. No mesmo trabalho, os autores utilizaram imagens SAR simuladas em três diferentes configurações de direção de voo e constataram que a orientação da trajetória, juntamente com a disposição das estruturas no terreno, influenciaram as feições de textura obtidas. Isto se justificou em função da natureza monoestática do imageamento por radar, ou seja, a mesma superfície imageada aparecia totalmente distinta em dois diferentes ângulos de visada.

Ulaby et al. (1986) trabalhando com imagens SEASAT (banda L, 16 *looks*), selecionaram duas medidas de 2ª ordem (contraste e homogeneidade) e comprovaram que usando apenas a informação tonal, o resultado obtido na classificação produziu 50% de precisão nas classes de uso analisadas. Combinando a informação tonal com medida de primeira ordem (desvio padrão), o desempenho passou para 69%. Ao usarem estatísticas de 2ª ordem, os autores verificaram resultados melhores que os anteriores, obtendo um percentual de 80% para cada medida classificada separadamente e de 88% para as medidas classificadas combinadas.

Pultz e Brown (1987) usaram imagens SAR CV580 (banda C, polarização VV) e STAR-1 (banda X polarização HH) aplicando medidas de textura de 1ª e de 2ª ordem para discriminação de alvos agrícolas. Os resultados obtidos das classificações feitas com medidas combinadas (contraste, dissimilaridade, correlação e média) foram superiores aos obtidos usando apenas uma medida.

Embora nestes estudos a eficiência da utilização das medidas de textura derivadas da MCNC para diferenciar alvos de interesse tenha sido constatada, poucas aplicações destas técnicas foram verificadas com mais rigor em pesquisas geológicas.

Ainda assim, Azzibrouck et al. (1997) utilizaram parâmetros texturais derivados da MCNC em uma imagem RADARSAT (banda C, polarização HH, *wide mode*). Uma classificação não supervisionada foi realizada com a utilização destas medidas, permitindo a separação das unidades litológicas da área. Os autores observaram ainda que uma análise das texturas permitiu evidenciar os diferentes contrastes morfológicos da imagem associados às unidades litológicas.

Pedroso (1998) utilizou medidas derivadas da MCNC, através de imagens SAR JERS-1, na caracterização de mineralizações do tipo *placers* da Província Mineral do Tapajós. Através de classificações não supervisionadas, o autor avaliou o desempenho destes parâmetros texturais nas imagens originais (com a resolução espacial original) e em imagens subamostradas (com a resolução espacial degradada pela metade). Os resultados obtidos nestas últimas, ao contrário do esperado, foi melhor em relação às primeiras.

ANÁLISE DE ATRIBUTOS TEXTURAIS

CONTEXTO Desde 1967, quando os depósitos de minério de ferro foram descobertos em Carajás, é reconhecido um marcante controle geobotânico, dado pela presença de coberturas lateríticas mineralizadas em ferro, e uma específica associação vegetal. Os depósitos estão relacionados a um conjunto de platôs, quase horizontais, capeados por carapaças lateríticas desenvolvidas a partir de rochas vulcânicas e minério de ferro. Uma cobertura vegetal do tipo savana conhecida como *campus rupestres*, com dominância de gramíneas e arbustos, está associada com as lateritas, e exibe um forte contraste em densidade (clareiras) com a cobertura vegetal envolvente de floresta Equatorial Ombrófila Densa.

A Província foi quase completamente recoberta com imageamentos por radar do SAREX'92. A avaliação preliminar destas imagens mostrou que as respostas na banda C (HH e VV) são sensíveis ao contraste geobotânico, ao exibir padrões tonais/texturais ligados às variações da associação laterita/vegetação (Morais, 1998; Moraes & Paradella,

1999). As respostas de retroespalhamento das microondas detectadas são controladas por variações na escala decamétrica (macro-topografia) e principalmente, por mudanças na escala centimétrica (rugosidade) sob um modelo de espalhamento superficial.

A pesquisa em NI visou basicamente avaliar o uso de atributos texturais de imagens SAR, obtidos via critérios estatísticos baseados na matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza das imagens (medidas de segunda ordem) e medidas de primeira ordem, através de classificação textural. O grande acervo de dados disponível para Carajás, seja aerotransportado (INTERA e SAREX'92) ou orbital (ERS-1, ERS-2, JERS-1 e RADARSAT-1), ainda não foi avaliado em toda sua potencialidade. Além disso, cientificamente, é interessante testar classificações estatísticas via textura de dados SAR com aplicações em geologia; tema pouco abordado na literatura; e que possam se aplicados à áreas com contextos geológicos similares.

ABORDAGEM METODOLÓGICA. Os procedimentos metodológicos adotados para classificações texturais das imagens relativas aos dados SAR do CV580 (SAREX) e RADARSAT-1 (modo fino F4 ascendente) encontram-se descritos na Figura 3, apresentado em Moraes (1998). Na primeira etapa, constam as correções radiométricas, que constituem a fase de pré-processamento dos dados SAR, imprescindível para as análises subsequentes. Nas correções radiométricas, estão incluídas a correção do padrão de antena e as filtragens para atenuação do *speckle*, aplicada somente ao dado orbital RADARSAT-1 (1 *look*), já que as imagens SAREX'92 estão processados com 7 *looks*.

Ressalta-se aqui que a presença de *speckle* prejudica a interpretação radiométrica das imagens SAR, dificultando o reconhecimento de similaridades e diferenças tonais e texturais entre áreas adjacentes (Werle, 1988). Como a textura da cena pode confundir-se com a textura relacionada ao *speckle* (textura da imagem), a atenuação deste ruído deve ser feita de forma a não comprometer a textura da cena, acarretando perda de informação. Por este motivo, a escolha do tipo de filtro e o tamanho da janela a serem

usados está em função dos alvos de interesse contidos na cena, da resolução espacial e do número de *looks* da imagem.

A fase de processamento abrange as técnicas de seleção e geração das medidas de textura, a classificação digital das imagens de textura e o registro dos mapas temáticos obtidos. Os dados SAR foram processados sem que as imagens fossem corrigidas geometricamente, para que não ocorresse perda de informação textural durante a reamostragem dos níveis de cinza no processo de correção geométrica (Mather, 1987). Após esta etapa, foram feitas as avaliações quantitativas de cada mapa temático via matriz de confusão e estatística *kappa*.

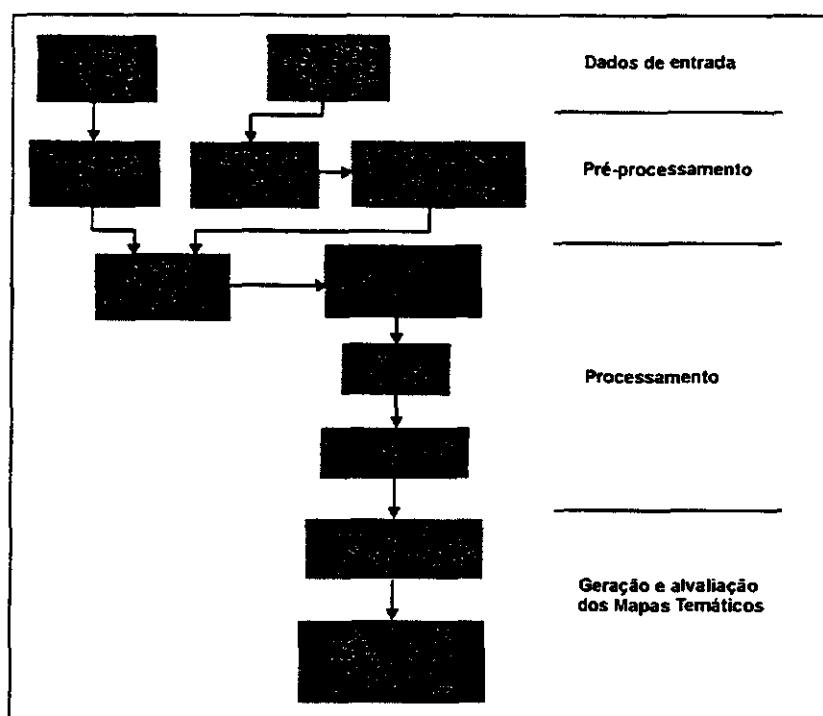


Fig. 3 – Fluxograma das etapas de processamento digital realizadas nas classificações texturais.

As etapas de pré-processamento correspondentes à correção do padrão da antena e atenuação do *speckle* são descritas na primeira parte do curso. Dessa forma, são apresentadas a seguir as etapas referentes à fase de processamento envolvida nas análises texturais.

SELEÇÃO DAS MEDIDAS DE TEXTURA. A seleção das medidas de textura é realizada através do algoritmo *Texture*, compilado para o *software* ENVI - versão 2.7 (1997). Este algoritmo, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por Rennó et al. (1998), baseia-se nos resultados obtidos na utilização de textura em região agrícola, para discriminação de diferentes tipos de uso em imagens de radar do SIR-C/X-SAR. As rotinas para a extração das amostras e o cálculo dos parâmetros estatísticos são feitas através do *software* “*Interactive Data Language*” (IDL) versão 5.0.2 (1997), utilizado para análise interativa de dados com funções matemáticas e estatísticas.

Nesta etapa e nas seguintes é aconselhável que os dados SAR devam ser processados sem as correções geométricas, preservando a informação textural da cena. A reamostragem dos níveis de cinza que ocorre no processo de correção geométrica compromete a radiometria da cena e consequentemente os atributos texturais da mesma.

Deste modo, para a seleção das medidas os seguintes procedimentos devem ser seguidos:

- a) Extração de regiões de interesse (“*Regions of Interest*” – ROIs) referentes às classes de interesse.
- b) Seleção das medidas de textura (primeira e segunda ordem) disponíveis no algoritmo *Texture*,
- c) Escolha das configurações das distâncias entre pixels para as medidas de segunda ordem
- d) Padronização dos valores obtidos em cada medida de modo a descartar valores muito distantes da média, estejam eles muito acima ou muito abaixo do valor médio.

Assim, para cada medida selecionada, o algoritmo calcula um fator discriminante F_{disc} , indicando se ela é ou não adequada para separar uma determinada classe de outra,

com base na variância intra e entre classes. Considerando então duas classes, 1 e 2, para uma determinada medida hipotética A, o fator discriminante F_{disc} é definido por:

$$F_{disc} = \frac{S_{12} + S_{21}}{S_{11} + S_{22}}$$

onde:

$$S_{11} = \sum ((temp_1 - m_1)^2)/n_1;$$

$$S_{22} = \sum ((temp_2 - m_2)^2)/n_2;$$

$$S_{12} = \sum ((temp_1 - m_2)^2)/n_1;$$

$$S_{21} = \sum ((temp_2 - m_1)^2)/n_2;$$

$temp_1$ = valores válidos de A para a classe 1;

$temp_2$ = valores válidos de B para a classe 2;

m_1 = média da medida A para a classe 1;

m_2 = média da medida A para a classe 2;

n_1 = número de valores válidos para a classe 1 e

n_2 = número de valores válidos para a classe 2.

A situação ideal para um bom valor de F_{disc} é aquela onde as variâncias da medida A para as classes 1 e 2 (1x1 e 2x2) são pequenas e as variâncias da medida A entre as classes 1 e 2 (1x2 e 2x1) são grandes, ou seja, o valor do numerador da equação acima é alto e o valor do denominador, baixo. Valores indesejáveis de F_{disc} alcançam 1 e indicam que os valores médios da medida A para as classes 1 e 2 são muito próximos. Mais detalhes sobre o algoritmo podem ser vistos em Rennó et al. (1998).

GERAÇÃO DAS IMAGENS DE TEXTURA. Uma vez selecionadas, as imagens de textura referentes às medidas escolhidas podem ser geradas através do *software* EASI-PACE (PCI - versão 6.2) com uma função denominada *Texture (Texture Analysis)*. Basicamente, esta função calcula uma medida de textura específica para cada *pixel* usando matrizes de co-ocorrência dos níveis de cinza ou vetores da diferença dos níveis de cinza, gerando uma imagem que representa os níveis de cinza desta medida. O

algoritmo gera uma imagem de saída onde os níveis de cinza representam uma medida textural da imagem de entrada.

Cada imagem de textura, obtida da matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza (MCNC) ou do vetor da diferença dos níveis de cinza, é computada para cada janela retangular, ou de dimensões pré-definidas, com a relação espacial da imagem de entrada. Isto é, a MCNC mostra a relação entre um dado *pixel* e um vizinho determinado e o vetor da diferença dos níveis de cinza, a ocorrência entre um dado *pixel* e as diferenças absolutas do *pixel* vizinho. A medida de textura é então colocada no centro da janela na posição apropriada na imagem de saída.

Para um controle mais apropriado dos níveis de cinza da imagem de textura gerada, as medidas são geradas em canais de 32 bits, e posteriormente discretizados para canais de 8bits (EASI-PACE/PCI, 1997). Os tamanhos das janelas utilizados mais utilizados são de 7×7 *pixels*, resultando de um compromisso de manter a matriz de co-ocorrência do níveis de cinza sensível aos detalhes de interesse na área, sem grandes demandas de tempo computacional de processamento, que aumenta com o aumento do tamanho da janela, conforme observado por Baraldi e Parmiggiani (1995).

CLASSIFICAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS DE RADAR. A maioria dos classificadores de imagens digitais disponíveis foram desenvolvidos para classificação de imagens ópticas multiespectrais e quase todos são classificadores do tipo por *pixel*. Isto é, cada *pixel* é classificado sem a relação de nenhuma informação sobre seus *pixels* vizinhos. Estes classificadores apresentam baixo desempenho em imagens SAR devido à ampla variância introduzida pelo ruído *speckle* (Ahern, 1995). Além disso, a maior parte dos sistemas de classificação disponíveis no mercado baseiam-se na hipótese dos dados serem normalmente distribuídos, o que raramente ocorre nas imagens SAR, exceto naqueles obtidos a partir de um grande número de visadas (Vieira et al., 1997).

A necessidade de uma nova abordagem de classificação de imagens de radar, que complemente o método MAXVER, pode ser sentida pelas dificuldades

mencionadas anteriormente. Vieira et al. (1997) abordam esta questão relatando a importância do desenvolvimento de técnicas e procedimentos estatísticos para classificação de imagens SAR, através de sistemas amigáveis para os usuários deste tipo de imagem. Segundo os autores, o critério de MAXVER não leva em consideração a radiometria relacionadas às classes, supondo que elas são eventos independentes. A incorporação das informações contextuais aos algoritmos classificadores, que só consideram as informações no domínio espacial, surge então como uma alternativa promissora para classificação de imagens de radar.

Neste sentido e dentro do contexto estatístico, alguns modelos que incorporam a informação contextual tem sido propostos, mas a grande maioria deles, apesar de permitirem uma maior flexibilidade, envolvem muita complexidade computacional (Frery, 1993). O autor apresenta então uma versão de um algoritmo de classificação contextual, denominado “*Iterated Conditional Modes*” (ICM), Modas Condicionais Iterativas, que possui um bom desempenho computacional e facilidade de uso. Aprimorado por Vieira (1996), a vantagem deste algoritmo é o fato de que ele pode ser implementado de tal maneira que o usuário, ao aplicá-lo, não necessita de mais conhecimentos que os requeridos para utilizar o método de classificação MAXVER.

O algoritmo ICM é um estimador baseado no modelo da distribuição a priori sob a estrutura dos campos aleatórios markovianos (Frery, 1993). Os campos markovianos são modelos probabilísticos que incorporam a dependência espacial entre variáveis aleatórias e isto é útil quando incorporado a um esquema bayesiano de processamento de imagens (Vieira, 1996). Além do ICM, outros estimadores de técnicas markovianas, são o “*Maximum a Posteriori*” (MAP), máximo a posteriori e o “*Marginal Posteriori Mode*” (MPM), moda marginal a posteriori. As descrições matemáticas e os modos de implementações do ICM tornam-se impraticáveis aqui. Por isso, mais detalhes sobre as técnicas markovianas, incluindo o ICM, que incluam também formalidades estatísticas, bem como outras referências que tratem do tema, podem ser vistas em Frery (1993) e Vieira (1996).

A rigor, o ICM é um método iterativo de refinamento de classificações que consiste em substituir a classe associada a cada coordenada pela classe que maximiza um determinado critério (Vieira et al. 1997). Este critério é a distribuição a posteriori da classe, dadas a radiometria (componente MAXVER) e as classes vizinhas (componente de contexto). A influência das classes vizinhas é quantificada por um parâmetro real (valores de porcentagens de mudanças), que é estimado iterativamente supondo um modelo para a distribuição espacial das classes (para o caso de dados monoespectrais).

O processo é interrompido quando a porcentagem de mudança (porcentagem de *pixels* que são reclassificados) parar em um máximo (possivelmente local). Ou seja, um valor de 5% significa que a reatribuição de classes aos *pixels* é interrompida quando apenas 5% ou menos do total de *pixels* da imagem foi alterado.

Na análise textural realizada no depósito de ferro N1 (Carajás – PA), a classificação supervisionada pelo método da máxima verossimilhança foi aplicada conforme os procedimentos descritos em Mather (1987). As amostras de treinamento para classes de interesse devem ser coletadas nos dados SAR considerando as verdades terrestres disponíveis (mapas geológicos, fotografias aéreas, dados de campo, etc.). Nesta fase, torna-se imprescindível uma análise minuciosa das imagens em função dos parâmetros do sensor (ângulo de incidência, polarização, comprimento de onda, direção de visada) e do alvo (rugosidade superficial). A pós-classificação é realizada pelo algoritmo ICM sobre todos os mapas classificados pelo método da máxima verossimilhança.

Para a avaliação dos mapas temáticos obtidos, utilizam-se matrizes de confusão com a coleta de amostras de teste diferentes das amostras de treinamento. Através deste procedimento, é possível avaliar a quantidade de *pixels* classificados correta e incorretamente em cada classe. O método mais utilizado para avaliar a exatidão da classificação com matrizes de confusão é o Coeficiente de Concordância *Kappa* (Rosenfield e Fitzpatrick, 1986; Hudson e Ramm, 1987; Foody, 1992), dado a seguir:

$$\hat{k} = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2};$$

onde:

$$\theta_1 = \frac{\sum_{i=1}^c x_{ii}}{N};$$

$$\theta_2 = \frac{\sum_{i=1}^c x_{i+} + x_{+i}}{N^2};$$

cujos elementos da matriz são,

c = número de linhas ou colunas da matriz de confusão;

x_{ii} = número de observações na linha i e coluna i ;

x_{i+} = soma dos valores na linha i ;

x_{+i} = soma dos valores da coluna i e

N = número total de observações.

REFERÊNCIAS

Ahern, F. *Conceitos fundamentais do radar imageador*; nível básico: Curso ProRADAR. São José dos Campos, 1995. 91p.

Anys, H.; He, D.C. Evaluation of textural and multipolarization radar features for crop classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.33, n.5, p. 1170-1181, Sep. 1995.

Azzibrouck, G.A.; Saint-Jean, R.; Prévost, C. Analyse de la texture d'une image RADARSAT pour la cartographie géologique dans la Forêt Équatoriale de Ngoutou, est du Gabon. [CD-ROM]. In: Geomatics in the era of RADARSAT (GER'97). *Proceedings*. Ottawa, Canada, 1997. [CD-ROM].

Baraldi, A.; Pramiggiani, F. An investigation of the textural characteristics associated with gray level cooccurrence matrix statistical parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 2, p. :293-304, Mar. 1995.

Bignelli, P.A. *Avaliação dos dados de radar (SAR) do Projeto Sarex '92 e ERS-1 em mapeamento geológico na região de Salobo, Província Mineral de Carajás*. São José dos Campos. 124p. (INPE - 5668-TDI/561). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.

Briand, P.; Gray, J.T. Classification de l'utilisation du territoire sur une image radar SIR-B, à partir de l'information texturale dérivée des statistiques de premier ordre. IGARSS'89 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., Vancouver, July 10-14. *Remote Sensing: an economic tool for the nineties*. Vancouver: IEEE/CCRS/URSI, 1989, v. 5 p.2777-2780.

Chellappa, R.; Jain, A. *Markov random field: theory and application*. New York, Academic Press, 1993. 581p.

Curran, P.J. The semi-varioram in remote snsing: na introduction. *Remote Sensing of Environment*, v. 24, n.3, p. 493-507, Apr. 1988.

Curlander, J.C. Utilization of spaceborne SAR data for mapping. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, v. GE- 22, n. 2, p. 106-112, Mar. 1984.

EASI-PACE (PCI Inc.) *Using PCI software*. Richmond Hil, 1997. 279p. (PCI Committed to Remote Sensing version 6.2 - EASI-PACE).

ENVI. *ENVI user's guide*. Version 3.0, Lafayette: Better Solutions Consulting, 1997. 614p.

Foody, G.M. On the compensation for change agreement in image classification accuracy assesment. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, v. 6 , n. 10, p. 1459-1460, Oct. 1992.

Frery, A.C. *Algumas ferramentas estatísticas na síntese, processamento e análise de imagens de radar de abertura sintética*. São José dos Campos. 228p. (INPE - 5548-TDI/534). Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

Frost, V.S.; Shanmugan, K.S.; Holtzman, J.C. The influence of sensor and flight parameters on texture in radar images. *IEEE Transations Geoscience Remote Sensing*, v. GE-22, n. 5, p. 440-448, Sept. 1984.

Haralick, R.M. Statistical and structural approaches to texture. *Proceedings of the IEEE*, v. 67, n. 5, p. 786-804, May 1979.

Haralick, R.M.; Shanmugam, K. Dinstein, I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics*, v. SMC-3, n. 6, p. 610-621, 1973.

Hudson, W.D.; Ramm, C.W. Correct formulation of the kappa coeficient of agreement. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, v. 53, n. 4, p. 421-422, Apr. 1987.

Hsu, Shin-yi. Textural-tone analysis for automated land-use mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 44, n. 21, p. 1393-1404, 1978.

Irons, J.R.; Peterson, M.W. Texture transformations of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, v. 11, n. 5, p. 359-370, 1981.

IDL. *Using IDL*, versão 5.0.2, s.l. 1997. 344p.

Khazenie, N.; Richardson, K.A. Identification of aerosol features such as smoke and dust in NOAA-AVHRR data using spatial textures. IGARSS'92 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 12., South Shore Harbour Resort and Conference Center NASA/ Clear Lake Area, Houston. *International Space Year: space remote sensing*, May 26-29, 1992. Hoes Lane, IEEE, URSI. 1992, v. 1, p.726-730.

Mather, P.M. *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. Chichester: John Wiley, 1987. 325 p.

Miranda, F.P.; Carr, J.R.; Taranik, J.V. Analysis of JERS-1 (Fuyo-1) SAR data for vegetation discrimination in northwestern Brazil using semivariogram classifier (STC). *International Journal of Remote Sensing*, v. 17, n. 17, p. 3523-3529, Nov.1996.

Morais, M. C. 1998. *Discriminação de lateritas minerlizadas em ferro no depósito NI (Carajás, PA) por radar imageador: uma avaliação através de classificação textural*. Dissertação de Mestrado em SER, INPE, pp. 171.

Morais, M. C., Paradella, W. R. 1999. Discrimination of iron-mineralized laterites in the Carajás Province (Amazon Region) based on textural attributes from C-band airborne (SAREX) and spaceborne (RADARSAT Fine Mode) SAR data. *Proceedings, Thirteenth International Conference on Applied Geologic Remote Sensing, Vancouver, Canadá, Vol II*, 388-395.

Novo, E.M.; Costa M.P.; Mantovani, J.E. Avaliação do uso de medidas de textura na discriminação de ambientes aquáticos do reservatório da UHE a partir de dados RADARSAT. [CD ROM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. *Anais*. Santos: Fábrica da Imagem, 1998. Seção de Comunicações Técnico-Científicas. [CD-ROM].

- Pedroso, E.C. *A utilização de imagens JERS-1/SAR e LANDSAT na caracterização espacial das mineralizações do tipo "placer" da Província Mineral do Tapajós*. Campinas. 151p. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- Pultz, T.J.; Brown, R.J., SAR image classification of agricultural targets using first and second-order statistics. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 13, n. 2, p. :85-91, 1987.
- Raney, K. 1998. "Radar fundamentals: technical perspective". In: F. M. Henderson & A. J. Lewis (eds.) *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing*, Nova Iorque, EUA, Am. Soc. Of Phot. and Remote Sensing, capítulo 2, pp: 9-130
- Rennó, C.D.; Freitas, C.C.; Sant'Anna, S.J.S. A system for region classification based n textural measures. [CD ROOM]. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 9., Santos, 1998. *Anais*. Santos, Fábrica da Imagem, 1998. Seção de Comunicações Técnico-Científicas. [CD-ROM].
- Rennó, C.D. *Avaliação de medidas texturais na discriminação de classes de uso utilizando imagens SIR-C/X-SAR do perímetro irrigado de Bebedouro, Petrolina, PE*. São José dos Campos. 73 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1995.
- Rosenfield, G.H.; fitzpatrick-Lins, K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrametric Engineering and Remote Sensing*, v. 52, n. 2, p. 223-227, Feb. 1986.

- Shanmugan, K.S.; Narayanan, V.; Frost, V.S.; Stiles, J.A.; Holtzman, J.C. Textural features for radar images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. GE-19, n. 3, p. 153-156, Apr. 1981.
- Shao et al. ERS-1 and JERS-1 for geological detection in Jiaodong region, Shandong, China. In: International Symposium of Remote Sensing of Environment; Thematic Conference: Remote Sensing Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, San Antonio, May 9-12, 1994. *Proceedings*. Ann Arbor, ERIM, 1994. v.2, p.65-72.
- Simonett, P.S.; Davis, R.E. Image analysis - active microwave. In: American Society of Photogrammetry (ASP). *Manual of Remote Sensing: theory, instruments and techniques*. Falls Church, 1983. v. 2, p.1125-1179.
- Soares J.V. et al. An investigation on the selection of the texture features crop discrimination using SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, v. 59, n. 2, p. 234-247, 1997.
- Trevett, J.W. *Imaging radar for resource surveys: remote sensing applications*. New York: Chapman and Hall, 1986. 313p.
- Ulaby, F.T.; Kouyate, F.; Brisco, B.; Lee Williams, T.H. Textural information in SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 24, n. 2, p. 235-245, 1986.
- Vieira, P.R. *Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança pontuais e ICM para imagens de radar de abertura sintética*. São José dos Campos. 227p. (INPE-6124-TDI/585). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.

- Vieira, P.R.; Yanasse, C.C.F.; Frery, A.C.; Sant'Anna, S.J.S. Um sistema de análise e classificação estatísticas para imagens SAR. In: Latino American Seminar on Radar Remote Sensing, 1., Buenos Aires, 2-4 Dec. 1997. *Image processing techniques*. Buenos Aires: ESA/INPE, 1997, p.179-185. (ESA SP-407).
- Wang, L; He, D.C. A new statistical approach for texture anlysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 56, n. 1, p. 61-66, 1990.
- Welch, R.M.; Kuo, S.S.; Sengupta, S.K. Cloud and surface textural features in polar region. *IEEE Transations on Geoscience and Remote Sensing*, v. 28, n. 4, p. 520-528, 1990.
- Weska, J.S.; Dyer, C.R.; Rosenfeld A. A compartive study of texture measures for terrain classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, v. SMC-6, n.4, p. 269-285, 1976.
- Werle, D. *Radar remote sensing: a training manual*. Ottawa: Dendron Resource Survey, 1988. 300p.
- Wirth, K.R.; Gibbs, A.K.; Olszewski Jr., W.J. U-Pb ages of zircons from the Grão Pará group and Serra dos Carajás granite, Pará, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, v.16, n.2, p.195-200, Jun. 1986.
- Woodcock, C.E.; Strahler, A.H.; Jupp, D.L.B. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, v. 21, n.3, p. 311-332, Apr. 1987.
- Yanasse, C.C.F. et al. Statistical analysis of SAREX data over Tapajós - Brazil. In: Workshop SAREX-92: South American Radar Experiment, 1., Paris, 1993. *Proceedings*. Paris: ESA, 1993. p. 25-40. (ESA WPP - 76).

