

ESTUDO DE ALVOS NATURAIS NOS MOSAICOS SIR-A (SHUTTLE IMAGING RADAR)

Milton Garcia Balieiro
Paulo Roberto Martini
João Roberto dos Santos
Juércio Tavares de Mattos

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq
Caixa Postal 515 - 12200 - São José dos Campos - SP - Brasil

RESUMO

Analisou-se os dados do SIR A (Shuttle Imaging Radar) coletados sobre o Brasil na Missão Space Shuttle-2. Descreve-se a resposta de alvos iluminados por feixes de microondas da banda L (1,275 GHz), emitidos num ângulo de incidência de 47° , a uma altura de 275 km. São discutidas diversas situações lito-estruturais, geomórficas e de cobertura florestal, num contexto comparativo entre imagens SIR-A e LANDSAT. Recomenda-se que os métodos de extração de informação de imagens SIR-A devem se apoiar de maneira preponderante na direção de iluminação, no ângulo local de incidência, no critério de espalhamento de Rayleigh e na topografia regional.

ABSTRACT

Shuttle Imaging Radar (SIR-A) data of some Brazilian areas are analysed. Several targets illuminated by L Band radar (1,275 GHz) with a 47° incidence angle, from an altitude of 275 km, are described. Some specific situations related to lithology, structure, morphology and forest cover are discussed in a comparative context of SIR-A/MSS-LANDSAT image attributes. It is recommended that methods to extract information from SIR-A image must consider account the illumination azimuth, the local incidence angle, Rayleigh's criterion for scattering and regional topography.

1. INTRODUÇÃO

O imageamento orbital, independente da cobertura de nuvens, das condições climáticas e da iluminação do Sol, foi possível através do SEASAT, em 1978. A curta vida útil deste satélite não impediu que fossem coletados dados de áreas continentais, embora a missão tenha sido desenhada para aplicações em Oceanografia. Imagens SEASAT obtidas em áreas continentais foram analisadas por Sabins et alii (1980) que mostraram sua utilidade para o imageamento geológico, a despeito do baixo ângulo de incidência (20°).

Com base nos resultados obtidos, a NASA e o JPL (Jet Propulsion Laboratory), durante a segunda missão do Space Shuttle, realizaram o primeiro experimento de radar orbital para pesquisa geológica. O radar imageador do Shuttle (SIR-A: Shuttle Experimental Radar A) imageou cerca de 10 milhões de km² de diferentes áreas da superfície continental da terra durante a missão de 1981. Parte deste acervo foi doado pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto da Universidade de Kansas ao Instituto de Pesquisas Espaciais, e vem sendo estudado, sob ponto de vista multidisciplinar, desde 1982.

Experimentos que envolvem sensores orbitais ativos, particularmente do tipo radar - imageador de abertura sintética, vêm sendo realizados e programados com ênfase. Assim, além da segunda missão do SIR, realizada em outubro de 1984, estão sendo programados diversos experimentos pela ESA, NASA e CCRS (tabela 1).

Estes eventos apontam para um novo limiar no campo do Sensoriamento Remoto orbital, a medida que extensas áreas dos domínios tropicais do planeta, até recentemente não investigados por imageamento sinótico e sazonal, poderão ser monitoradas e imageadas por sensores ativos. Este limiar poderá ser rapidamente atingido, considerando que apenas em 1961 a tecnologia dos radares de abertura sintética foi liberada para o plano civil (Ulaby, 1982).

Dentro desta perspectiva, este trabalho se propõe a contribuir, sob ponto de vista metodológico, para um melhor entendimento dos sinais refletidos ou retro-espalhados pelos alvos naturais e não-naturais da superfície terrestre. Para tanto, são analisados diferentes tipos de feições geomórficas, diferentes condições de macro e microrrelevo, cobertura de solo, feições lineares, estruturas geológicas e litologias; quanto ao brilho, são analisados o realçamento e a rugosidade apresentadas nas imagens SIR-A.

2. IMAGENS SIR-A

As imagens SIR-A analisadas traduzem diferentes intensidades de retorno de um radar de abertura sintética que opera na banda L (23,5 cm), a uma altitude de 275 km, com sinais transmitidos segundo um ângulo de incidência (off nadir) de 47°, com polarização HH. A resolução espacial nominal das imagens SIR-A é de 40 metros.

O experimento SIR-B realizado em outubro de 1984 manteve algumas das características do SIR-A, entretanto variou o ângulo de incidência entre 20° e 70°.

A Tabela 2 mostra as características técnicas dos diversos experimentos SIR programados para o Space Shuttle na década de oitenta.

3. RECOBRIMENTO SIR-A NO BRASIL

O recobrimento SIR-A no Brasil compreendeu parte das órbitas 12, 22, 23 e 28 (Figura 1). Destas órbitas duas foram descendentes (NW - SE), com iluminação orientada para NE (órbitas 22 e 23), enquanto duas foram ascendentes (SW - NE), com iluminação dirigida para NW (órbitas 12 e 28).

Os dados SIR-A utilizados neste trabalho compreendem mosaicos fotográficos da órbita 22, na escala 1:500.000. Desta órbita foi selecionado o

TABELA 1

EVENTOS ORBITAIS, COM RADAR IMAGEADOR DE ABERTURA SINTÉTICA,
PROGRAMADOS PARA OS ANOS 1980

	ESA-ERS-I	NASA - SAMEX				CCRS-RADARSAT
FREQUENCIA	BANDA C	A BANDA L	B BANDAS L,C	C BANDAS L,C,X	D BANDAS L,C,X	BANDA C
ÂNGULO DE VISADA	—	VARIÁVEL 15°—60°				30°—45°
RESOLUÇÃO	—	35 metros				25m
ALTITUDE	675 km	250 — 325 km				1.000 km
POLARIZAÇÃO	—	MULTI—POLARIZAÇÃO				NE
FAIXA NO TERRENO	—	50 km				150 km
DATA	1.987	1.988	1.989	1.989	1.990	1.990
ÓRBITA	QUASE-POLAR	INCLINADAS 57°				QUASE-POLAR
DURAÇÃO	3 ANOS	7 DIAS CADA				3-5 ANOS

ESA-ERS-I : EUROPEAN SPACE AGENCY — EUROPEAN REMOTE SENSING SATELLITE

SAMEX : SHUTTLE ACTIVE MICROWAVE EXPERIMENT

CCRS : CANADA CENTRE OF REMOTE SENSING

Fonte: Ulaby (1982)

TABELA 2

CARACTERÍSTICAS DOS DIVERSOS EXPERIMENTOS RELATIVOS AO SIR,
PROGRAMADOS PARA O SPACE SHUTTLE

	SIR - A	SIR - B	SIR - C	SIR - D
DATA	1.981	1.984	1.985	1.987
FREQUÊNCIA	BANDA L	BANDA L	BANDA L e BANDA X ou BANDA C	CARACTERÍSTICAS IDÊNTICAS AO SIR - C EXCETO QUE O RECO - BRIMENTO SERÁ SAZONAL
ÂNGULO DE VISADA	FIXO: 47°	VARIÁVEL e OPCIONAL (20°-70°)	VARIÁVEL e OPCIONAL (20°-70°)	
ESTEREOSCOPIA	NÃO	SIM	SIM	
CALIBRAÇÃO	NÃO	SIM	SIM	
RESOLUÇÃO	40 m	10 - 30 m	10 - 30 m	
FAIXA DO TERRENO	50 km	35 - 125 km	35 - 125 km	
GRAVAÇÃO	ÓTICA	DIGITAL e ÓTICA		
PROCESSAMENTO	ÓTICO	DIGITAL e ÓTICO		

Fonte: Dellwig e Bare (1981)

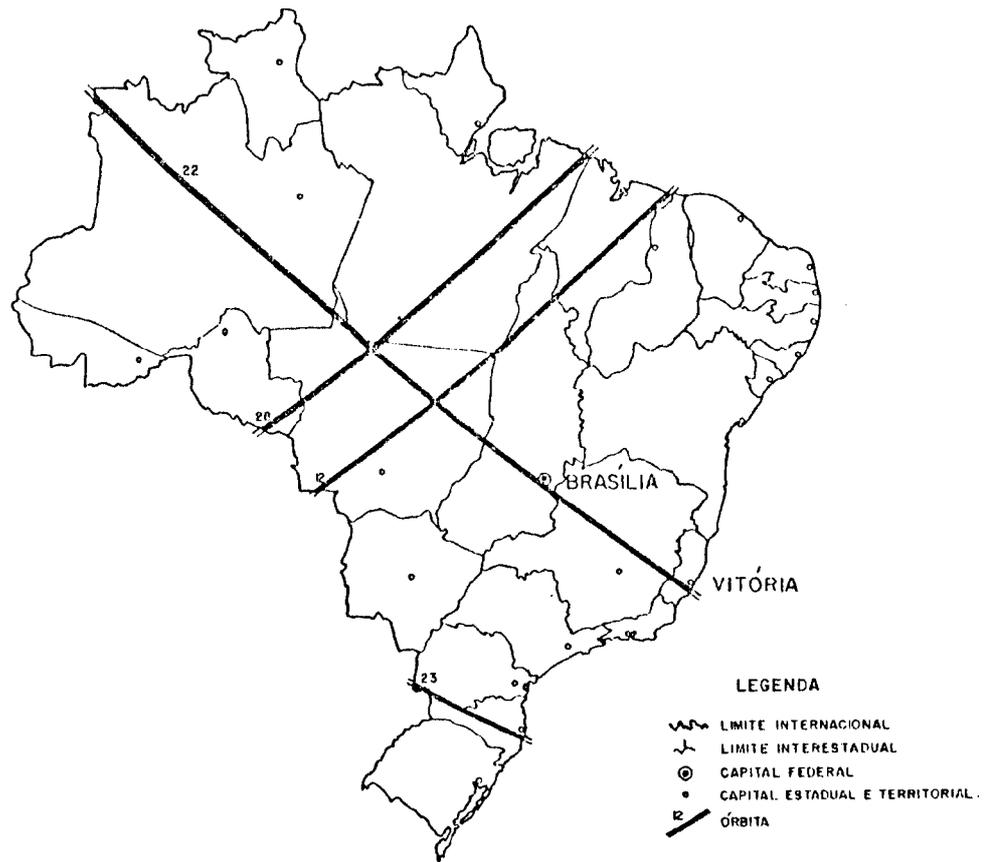


Fig. 1 - Recobrimento SIR-A no Brasil

Fig. 2 - Exemplos de superfícies lisas e rugosas nas imagens SIR-A. As assinaturas de radar observadas nos quadrantes NE e SE da figura obedecem ao critério de Rayleigh para espalhamento: tons escuros para superfícies lisas e claros para superfícies rugosas. As assinaturas claras são exemplos de superfícies rugosas formadas por lateritas com cobertura de cerrado e matas-galeria. No centro da figura verifica-se uma área de assinatura escura com limites bem definidos, associada a solos preparados para cultivo, no alto da chapada divisora dos rios São Bartolomeu e Preto, na margem da BR-251, entre Brasília (DF) e Unaí (MG).

Fig. 3 - Assinaturas de radar na região próxima a Unaí (MG).
A região plana na parte inferior da figura mostra assinaturas claras (laterita com cerrado) e escuras (solos preparados para soja, milho e arroz), onde o sinal de retorno de radar é controlado pelo critério de espalhamento de Rayleigh para microrrelevo.

trecho compreendido entre Brasília (DF) e Vitória (ES), seguindo uma faixa orientada segundo a direção N60W, com largura de 50 km no terreno.

A seleção desta área deveu-se aos seguintes fatores: a) boa qualidade das cópias fotográficas SIR-A; b) presença de situações geomórficas marcadamente diferentes; c) ambientes geológicos bastantes diferenciados; d) ampla variedade nas classes de cobertura do solo; e) vasto acervo bibliográfico; f) facilidades de acesso à área; g) disponibilidade de imagens LANDSAT de boa qualidade.

4. INTERAÇÃO DO SINAL DE RADAR COM A CENA

Os parâmetros que afetam mais diretamente a intensidade do sinal de retorno e portanto, o tom ou o brilho observados nos mosaicos estão relacionados com as características geométricas do terreno, com os parâmetros do sistema sensor e com as propriedades dielétricas dos alvos.

Os parâmetros de um sistema de radar, que exercem forte influência no sinal de retorno constantemente referidos na literatura, são o comprimento de onda, o ângulo de visada e o tipo de polarização para transmissão e recepção. Estes parâmetros para o SIR-A estão apresentados na Tabela 2.

Dellwig e Bare (1981) ressaltam dois aspectos importantes da geometria da superfície que influenciam fortemente o sinal de retorno: o micro e o macrorrelevo. No contexto de microrelevo, Sabbins et alii (1980) afirma que, de acordo com o critério de Rayleigh, uma superfície é definida como rugosa ou lambertiana quando seu relevo (h) é maior que a relação $\frac{\lambda}{4,4 \cos \theta}$ onde: λ = comprimento de onda e θ = ângulo de incidência (off nadir). Uma superfície lisa ou especular obedece à seguinte relação:

$$h < \frac{\lambda}{25,5 \cos \theta}$$

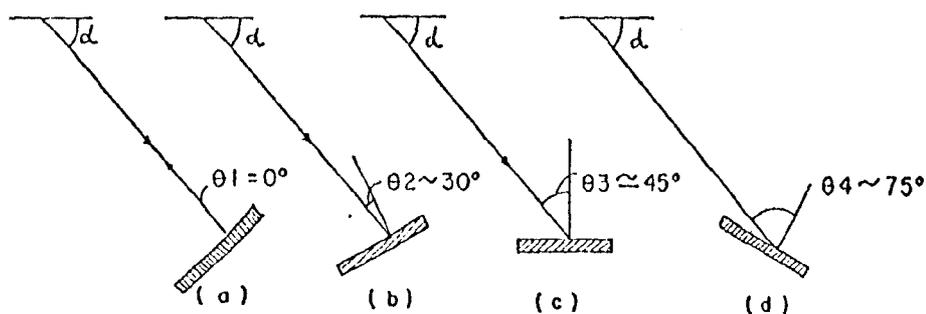
No caso do SIR-A, estes valores são respectivamente $h > 7,8$ cm (superfície rugosa) e $h < 1,35$ cm (superfície lisa).

Para o sinal de radar as superfícies especulares tendem portanto a apresentar assinaturas escuras, uma vez que nenhum sinal retorna à antena. As superfícies rugosas tendem a apresentar assinaturas claras, considerando que parte do sinal espalhado retorna à antena. Exemplos também podem ser observados nas figuras citadas anteriormente. Exemplos de alvos com este tipo de comportamento observados nos mosaicos SIR-A, estão apresentados nas Figuras 2 e 3.

No contexto de macrorrelevo o sinal de retorno é controlado pela inclinação e azimute das vertentes. Assim, vertentes normais à direção de iluminação (pró-vertentes ou ante-vertentes) geram fortes sinais de retorno, independente das suas condições de rugosidade. As vertentes voltadas para direção contrária à iluminação do radar (pós-vertentes) refletem na direção contrária, portanto tem um sinal de retorno menor, gerando assinaturas escuras.

A Figura 4 ilustra as modificações no ângulo de incidência, em função de diferentes situações locais de inclinação de vertentes, as quais re

sultam em diferentes intensidades de sinal de retorno. Ângulos de incidência local, progressivamente menores, resultam em sinais de retorno de radar mais intensos e, portanto, em assinaturas mais claras.



ÂNGULO LOCAL DE INCIDÊNCIA : $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3$
 SINAL DE RETORNO : $a > b > c$

Fig. 4 - As vertentes voltadas ou contrárias à direção de iluminação de radar geram diferentes sinais de retorno em função dos diferentes ângulos de incidência local.

Fonte: Dellwig e Bare (1981)

Na área deste trabalho os efeitos de macro e microrrelevo nos sinais de retorno de radar mostraram-se coerentes com o descrito na bibliografia consultada, embora os autores insistam que, nos comprimentos de onda do SIR-A, o macrorrelevo afeta mais o sinal de retorno do que o microrrelevo. Isto não é válido para as áreas planas (chapadas e interflúvios tabulares) analisadas neste trabalho, pois nos casos estudados o controle de microrrelevo é típico.

Imagens de radar estão sujeitas às distorções internas devido à geometria do imageamento. Estas distorções refletem-se nas imagens através da compressão das vertentes (foreshortening) e da inversão do relevo (layover). Sabbins (1983) assinala que, devido ao ângulo de depressão moderado do SIR-A ($\sim 40^\circ$), o "layover" destas imagens não é pronunciado e não interfere nas interpretações. Dellwig e Bare (1981) afirmam que o SIR-A, quando operando a uma altitude de 275 quilômetros e com uma largura de feixe de $6,2^\circ$ e $1,2^\circ$, tem o ângulo de depressão que varia entre $45,5^\circ$ e $40,7^\circ$. Segundo estes autores, esta pequena variação mantém os parâmetros de cena e de imagem mais constantes na direção transversal dos mosaicos do que nos sistemas aerotransportados.

Ulaby (1982), ao tratar das propriedades dielétricas, afirma que um radar imageador de banda L pode discriminar, numa escala regional, uma área seca de uma área muito úmida; embora nestas baixas frequências (1,275 GHz) o coeficiente de espalhamento dos solos seja mais sensível à rugosidade da superfície. Sabbins (1982), ao se referir às propriedades dielétricas, destaca que para rochas, solos e vegetação elas são determinadas principalmente pelo conteúdo de umidade. Analisando as imagens SIR-A da Indonésia, este autor afirma que os efeitos da topografia e da rugosidade mascaram as variações

ções do sinal de retorno causadas por diferenças nas propriedades dielétricas.

As constatações destes autores indicam que não se deve esperar efeitos significativos no sinal de retorno do SIR-A quanto à influência das constantes dielétricas e da geometria interna da imagem. Mesmo assim, estes efeitos estão sendo estudados pelos autores, embora até o presente estágio do trabalho, nenhuma situação tenha sido observada nas análises desenvolvidas sobre os dados SIR-A.

5. INTERPRETAÇÕES E COMPARAÇÕES SIR-A E MSS

5.1 - ASPECTOS GERAIS

Durante os últimos dez anos, as pesquisas voltadas para a extração e análise de produtos de sensoriamento remoto, para recursos terrestres, principalmente ao nível orbital, permitiram evidenciar uma crescente complexidade na definição e nos critérios de extração de informações nos diversos produtos gerados. Razão esta, explicada, em princípio, pelas características intrínsecas do próprio sistema sensor utilizado (plataforma, trajetória, sensor propriamente dito, tipo de produto gerado, escala, resolução, etc.), e posteriormente pelas características pertinentes à área a ser analisada (Geologia, Geomorfologia, Vegetação, Uso da Terra, etc.).

No presente estudo, visto que o SIR-A recobre uma extensa porção estreita faixa do território nacional, torna-se difícil fazer uma análise global das principais províncias geológicas, geomorfológicas e mesmo da distribuição da cobertura vegetal, visando testar a capacidade deste sensor ou mesmo compará-lo com outros sensores como o MSS/LANDSAT. Por isto, selecionaram-se alguns exemplos que serão comentados a seguir.

5.2 - ASPECTOS GEOMÓRFICOS

Optou-se por escolher duas áreas isópicas distintas com distribuição expressiva em área para averiguar suas características geomórficas reproduzidas fotograficamente em termos de imagem.

Neste contexto, a principal preocupação na escolha das áreas isópicas foi a de que elas apresentassem características distintas em termos geológicos e morfológicos, visto que o SIR-A apresenta um ângulo de visada peculiar ($\approx 47^\circ$) e uma resolução de 40 m. Os dados do MSS-LANDSAT também analisados apresentam azimutes em torno de 50° com elevação solar média de 35° e varredura aproximadamente leste-oeste. Ressalta-se que aqui não serão abordadas as distorções geométricas existentes nos sensores, e sim as características apresentadas pelos alvos nas imagens analisadas.

É necessário mencionar que os critérios adotados para a análise das áreas foram baseadas nas formas de relevo e drenagem, com uma visão regional integrada que predomina sobre a análise detalhada das características apresentadas pelas áreas.

Na individualização das áreas isópicas adotou-se como sistemática de análise a definição de elementos texturais no espaço, de tal forma que um padrão de organização pudesse ser caracterizado, exprimindo assim uma

forma. As formas de relevo foram analisadas quanto à densidade de textura de relevo, quebras positivas, assimetria, lineações e lineamentos. Como fatores que controlam as propriedades de textura e estrutura das formas (as sociados a relevo e drenagem) adotou-se para a análise a resistência à erosão, permeabilidade, plasticidade, ruptibilidade e tropia. A partir desta ótica de análise passar-se-à a descrever as duas áreas isópicas:

ÁREA DE UNAÍ

Esta área está situada na parte mediana da bacia do Rio Preto, na porção oriental do Distrito Federal e mostra uma região de relevo diversificado, predominando o do tipo dobrado e fraturado com uma grande variação litológica horizontal e vertical.

Nas imagens do SIR-A essa área apresenta-se com microfieções de relevo bem acentuado e orientado, apresentando uma textura de fina a média, o que lhe confere uma densidade de alta a média. Mostra-se com cristas (quebras positivas) agudas que definem limites bem nítidos, talvez exibindo um exagero delas pelo fato de as faces pró-vertentes estarem mais iluminadas. O relevo é fortemente assimétrico, com vertentes mais suaves para nordeste, podendo esta assimetria estar mais acentuada pelo motivo das faces mais iluminadas estarem voltadas para SW. As lineações de relevo (feições lineares fortemente estruturadas) acham-se bem caracterizadas e distribuídas em toda a área, com grande nitidez, formando extensos " trends " que provavelmente se associam a traços de foliação das rochas filitosas da área. Os alinhamentos de relevo, considerados como feições bastante salientes e retilíneas ou levemente curvas, também são destacáveis na fotografia, o que confere às cristas uma continuidade de dezenas de quilômetros. Podem-se associar os alinhamentos de relevo provavelmente a eixos de anti-formes e sinformes, acentuados por falhamentos paralelos a eles.

Quanto à resistência à erosão, devido à ausência de estereoscopia, e conseqüentemente a dificuldades na análise das formas de vertentes e encostas, pode-se apenas constatar que a presença de cristas intercaladas com vales amplos mostra que o grau de resistências das rochas é diferente. Portanto, ocorrem dois tipos litológicos distintos: as cristas côncavas, que representam as rochas muito resistentes, e as encostas rebaixadas e aplainadas, que representam as pouco resistentes.

A permeabilidade, analisada em termos inversos à densidade de drenagem, mostra-se nas imagens do SIR-A com densidade baixa, o que pressupõe estar diante de rochas clásticas ou organoquímicas. Esta permeabilidade é perfeitamente visualizada, pois os canais de drenagem, exibem um bom contraste de tonalidade (claras) em relação às áreas adjacentes.

A plasticidade e ruptibilidade, analisadas através do grau de fraturamento, não são bem evidenciadas neste sensor (SIR-A) ou ausentes na área. As lineações de drenagem, associadas a traços de foliação, são esparsas e paralelas e provavelmente são traços de fratura cuja densidade é baixa, podendo ser classificada de pouco fraturada.

Quanto à tropia que se refere ao desenvolvimento orientado das formas de relevo e à drenagem nas imagens do SIR-A, esta região apresenta al

to grau de anisotropia, o que mostra uma área fortemente dobrada, onde a presença das cristas alinhadas e fortemente orientadas tem grandes expressões em área.

A área de Unaí, quando analisada no MSS do LANDSAT, mostra propriedades (formas de relevo e drenagem) semelhantes, apresentando diferenças principalmente quanto à densidade de textura e assimetria.

A densidade de textura do MSS é menor onde o microrrelevo é mascarado, porém permite uma maior definição dos limites entre as quebras de relevo. Esta área, quando analisada regionalmente permite uma maior definição desta zona isópica. Portanto, este trabalho deixa um espaço para a discussão quanto à melhor ou à pior definição de províncias estruturais com menor quantidade de informações de densidade de textura, a qual, por sua vez, melhora regionalmente a definição da área isópica.

Com respeito à assimetria no MSS, o relevo mostra-se contrário, à assimetria apresentada no SIR-A, ou seja, é simétrica. Assim fica um impasse: caso se analise a área pelo SIR-A ela é caracterizada como fortemente inclinada com caimento para NE, e caso se analise pelo MSS ela apresenta declives aproximadamente iguais. Estas diferenças poderão prejudicar ou falsear as interpretações do ponto de vista geológico-estrutural.

A área de Unaí, citada aqui como exemplo, poderá ser extrapolada para a região da Serra do Espinhaço, guardando as devidas proporções e características peculiares.

ÁREA CHAPADÃO DOS GERAIS

A área dos Chapadão dos Gerais, que corresponde ao divisor de águas do rio São Francisco e das bacias do rio Santo Antônio e do rio do Sono, constitui um bom exemplo de zona isópica formada por relevos de superfícies tabulares laterizadas, que representam as coberturas cretácicas da área. Nesta área as mesmas propriedades e fatores analisados para a região de Unaí foram investigados.

Devido ao relevo plano e à forte atividade antrópica, praticamente todas as propriedades de relevo acham-se prejudicadas em sua análise. Somente as quebras de relevo são nítidas, embora com dificuldade de delimitação. É na rede de drenagem, bem desenvolvida e bem evidenciada pelos seus tons claros, que se pode estabelecer alguma análise; a qual mostra uma baixa densidade de textura de relevo (quase nula), ausência total de lineações e alinhamentos de relevo. Quanto à permeabilidade mostra-se com densidade alta, o que indica sedimentos semi-inconsolidados ou inconsolidados. O fraturamento é quase ausente e pode-se dizer que não existe traço de fratura. Esta área, através de sua textura e elementos de drenagem, sugere a presença de rochas isotrópicas, com estruturas de acamamento, que indicam a presença de camadas horizontais.

Nas imagens MSS do LANDSAT as observações acima são válidas tanto para o canal 5 como para o canal 7. Como principal diferença, vê-se que es

ta zona fica mais bem definida em termos regionais, e a densidade de textura do relevo, que poder ser considerada nula, é traduzida por tons de cinza-claro (canal 7) e cinza escuro (canal 5) homogêneos, os quais permitem a sua melhor individualização.

Ressalta-se que, quando se compara os dados do SIR-A com os do MSS-LANDSAT, confrontando-os com as propriedades analisadas, verifica-se que as relações são as mesmas, o que permite dizer que tanto os sensores como as propriedades fornecem fortes subsídios para a interpretação final; o que difere na maior ou na menor definição destas propriedades entre os dois sensores e a própria condição de imageamento e a faixa espectral utilizada. No SIR-A, devido ao relevo plano e às intensas culturas na época da obtenção dos dados, a análise foi mais difícil enquanto no MSS (principalmente no canal 7) estas variáveis não interferiram (relevo plano e cobertura vegetal).

5.3 - ASPECTOS GEOLÓGICOS

Na análise visual das imagens, que visa o estudo de alguns aspectos geológicos da área, foram utilizados os critérios convencionais da fotointerpretação geológica (tonalidade, textura, morfologia, drenagem, etc), levando em consideração as peculiaridades das imagens multiespectrais (MSS LANDSAT) e das imagens de radar (SIR-A). Também foram considerados os dados obtidos no reconhecimento de campo (Balieiro et alii, 1983 e Balieiro et alii, 1984) e dados da literatura geológica, incluindo os trabalhos de Menezes (1977) e Menezes (1978).

Na área investigada as imagens de radar (SIR-A) e MSS/LANDSAT revelaram a presença de grande quantidade de lineamentos estruturais associados a falhamentos ou fraturamentos, os quais constituem feições lineares ou suavemente curvilíneas que atingem dimensões quilométricas, compondo um padrão estrutural complexo.

Os lineamentos são mais notáveis e abundantes nas áreas de rochas arqueanas no Espírito Santo (Faixa costeira) e em Minas Gerais (Complexo Migmatítico de Minas Gerais (Inda et alii, 1984)). Estes lineamentos aparecem em quantidade semelhantes tanto nas imagens de radar quanto nas imagens MSS, porém são mais bem evidenciados nas imagens multiespectrais, constituindo formas de relevo positivas ou negativas, contínuas ou descontínuas, fortemente impressas na morfologia.

As imagens de radar analisadas pertencem ao primeiro experimento do SIR-A que operou com um radar de visada lateral com um ângulo de visada relativamente amplo (47° relativamente ao nadir), importante para o realce das feições topográficas.

As imagens de radar têm a característica de realçarem os elementos topográficos do relevo (escarpas) através do efeito de sombreamento, principalmente as feições lineares com expressão topográfica, dispostas paralelas ou obliquamente à linha de vôo.

Os lineamentos presentes nas rochas arqueanas citadas anteriormente distribuem-se em diversas direções. No entanto, conforme o sensor (SIR-A ou MSS), certas direções não aparecem ou ocorrem dissimuladas.

Na área investigada as imagens de radar do SIR-A não realçam as direções de lineamentos normais à linha de vôo da espaçonave (N60W), significando que os lineamentos nas direções próximas de N 30 E não foram bem evidenciados, sendo bem definidos nas imagens MSS, cujas linhas de varredura estão próximas a leste/oeste, proporcionando a identificação desses lineamentos com grande nitidez. Um exemplo disto pode ser verificado no lineamento a este de Iúna (ES), onde se observa um grande lineamento (N 20 E), formando uma faixa cataclástica bem caracterizada nas imagens MSS e pouco evidente no radar do SIR-A.

No Estado de Minas Gerais, na região de Caratinga, Ipatinga, Coronel Fabriciano, Dolores de Guanhaes, Cubas, Ferros, Mesquita e Dom Joaquim, os lineamentos de direção N70/80E (próximos à linha de varredura do MSS) quase não aparecem nas linhas multiespectrais, e quando surgem são mal definidos e pouco expressivos, sem muita continuidade, sendo bastante proeminentes nas imagens de radar do SIR-A. Na região de Viana/Guaraparé (ES) os lineamentos N 70 E são bem nítidos, mesmo nas imagens MSS, provavelmente em função do relevo fortemente acidentado presente nesta área.

Na faixa de Dobramento Brasília, nas rochas do Grupo Bambuí (Formação Paraopeba), na região de Unaí (MG), percebe-se um padrão de dobramento holomórfico evidenciado por um relevo de cristas (arcósis) que constitui um relevo "apalachiano" típico, formado por serras paralelas orientadas aproximadamente na direção noroeste. Estas feições aparecem com tonalidade de clara nas imagens de radar, porém são mais bem definidas e discriminadas nas imagens MSS, aparecendo com tons de cinza-escuro nos canais 6 e 7.

Na Serra do Espinhaço Meridional em Minas Gerais, na região de Congonhas do Norte, observa-se uma série de estruturas extensas que formam grandes escarpas paralelas orientadas na direção N30W, consideradas como falhamentos inversos ou de empurrão, as quais são bem caracterizadas nas imagens MSS e radar; porém são mais proeminentes e mais bem definidas nas imagens de radar devido ao forte sombreamento que destaca a topografia.

Por outro lado, feições topográficas de menor porte, tais como as lentes de calcários do Grupo Bambuí, que apresentam um relevo de morros e pequenas serras ravinadas, não se destacam nas imagens de radar; estas feições são bem visíveis nas imagens MSS, e são caracterizadas por uma textura rugosa e tons de cinza-claro nos canais 6 e 7, contrastantes com a tonalidade cinza-médio das áreas adjacentes.

O braquianticlinal da Serra do Cabral é mais visível nas imagens MSS, apresenta tons de cinza-médio a escuro nos canais 5, 6 e 7, e tons de cinza-claro a esbranquiçado nas imagens de radar do SIR-A.

Os diques de rochas básicas presentes nas rochas do Super Grupo Espinhaço, imperceptíveis nas imagens de radar, aparecem com tons de cinza-claro nos canais 6 e 7, contrastantes com a tonalidade escuro das áreas adjacentes.

Em termos de geologia estrutural, tanto as imagens de radar quanto as imagens MSS, mostram-se valiosas na obtenção de dados geológicos; porém em termos de individualização das unidades estratigráficas elas são pobres em relação às imagens MSS, as quais possuem diversos canais que mostram contrastes tonais acentuados.

Foram utilizados os canais 5, 6 e 7. Em função do seu elevado contraste tonal, o canal 5, em geral, possibilitou uma melhor discriminação das unidades estratigráficas, enquanto os canais 6 e 7 foram mais usados na caracterização das estruturas geológicas, revelando-se importante para a caracterização dos aspectos topográficos.

Apenas em algumas áreas as imagens SIR-A mostram-se úteis com relação ao aspecto tonal. Como exemplo pode ser citado a região de Ipatinga/Coronel Fabriciano (MG), na Depressão Interplanáltica do Rio Doce, onde se observa uma zona depressiva sustentada por rochas ectiníticas do Complexo Migmatítico-granulítico de Minas Gerais. Nos ectinitos predomina um relevo de colinas com vales de fundo chato, contrastante com o relevo acidentado (montanhoso), presente nas suas proximidades. Nas imagens SIR-A esta unidade possui uma textura lisa ou fracamente rugosa, apresentando tonalidade cinza-claro, bem contrastante com os tons de cinza-escuro das rochas adjacentes. Neste caso, o aspecto tonal foi importante, porém, no geral, o aspecto textural, determinado principalmente pelas formas de relevo, é mais representativo na discriminação das unidades geológicas. Nas imagens MSS esta área possui as mesmas características texturais, a qual apresenta tonalidade de cinza-médio a claro no canal 7, cinza-escuro no canal 5 e cinza-médio no canal 6.

Em áreas do Complexo Migmatítico-granulítico de Minas Gerais, com posto de associações de rochas polimetamórficas de idade supostamente arqueana, foram identificadas diversas unidades (complexo gnaissico-migmatítico, complexo kinzigítico, complexo charnockítico, granitóides, ectinitos, etc). Nas imagens SIR-A o reconhecimento destas unidades é bastante difícil, às vezes possível principalmente devido às características texturais que as unidades geológicas apresentam nas imagens.

Para referenciar os fatos anteriormente descritos será citado o exemplo dos gnaisses kinzigíticos que ocorrem na Faixa Costeira do Espírito Santo (região de Victor Hugo, Domingos Martins). Nas imagens examinadas os kinzigitos mostram uma textura rugosa, relevo de cristas e colinas, com vertentes ravinadas e vales bastante encaixados, esculpido em áreas dobradas, falhadas e intensamente dissecadas pelos rios. Esta unidade apresenta características texturais semelhantes nas imagens MSS e SIR-A, porém o critério mais importante para a sua discriminação na área investigada é a tonalidade cinza-escuro mostrado no canal 5, enquanto no SIR-A apresenta tons de cinza semelhantes ao padrão tonal das unidades vizinhas.

Nas rochas arqueanas do Complexo Migmatítico-granulítico de Minas Gerais foram individualizados complexos graníticos, provavelmente intrusivos, os quais exibem formas circulares, elípticas ou irregulares, fortemente discordantes das rochas encaixantes. Estes corpos graníticos são facilmente identificáveis nas imagens multiespectrais, principalmente devido ao contraste tonal e topográfico, sendo menos expressivos nas imagens de radar.

Na serra do Espinhaço, na região de Conceição do Mato Dentro (MG), as sequências itabiríticas são claramente individualizadas nas imagens MSS, devido ao destaque topográfico e aos tons de cinza discordantes entre os itabiritos e as rochas adjacentes. Na região do infravermelho (canal 7) verifica-se grande diferença espectral entre rochas ricas em ferro (itabiritos) e pobres em ferro. Normalmente os itabiritos aparecem com tonalidade cinza-escuro no canal 7 (baixa reflectância) e contrastante com os tons de cinza-claro ou médio nas áreas adjacentes. No radar os itabiritos aparecem pouco nítidos, confundindo-se com as unidades geológicas.

Um exemplo típico de contrastes tonais verifica-se na serra do Espinhaço, onde se encontra a Formação Santa Rita (Super Grupo Espinhaço), descrita por Pflug (1968). Esta unidade ocorre numa faixa bem estreita, porém é bem individualizada nas imagens MSS, principalmente nos canais 6 e 7, nos quais aparece com uma textura lisa e com tons de cinza-claro, totalmente contrastantes com a tonalidade escura das adjacentes. No radar (SIR-A) esta unidade não é discriminável.

5.4 - ASPECTOS DE VEGETAÇÃO E USO DA TERRA

Ao comentar a interação da radiação nos comprimentos de onda em que operam o sistema sensor do SIR-A, no caso, o radar, com a vegetação, Dellwig e Bare (1981) relatam a influência do conteúdo hídrico existente nas folhas das plantas sobre o sinal de retorno. Este tipo de influência pode permitir um conhecimento, por inferências, da fisiologia parcial de determinada comunidade vegetal. É evidente, contudo, que a estrutura da vegetação e a densidade de cobertura foliar também podem apresentar-se como parâmetros de influência na resposta espectral deste sensor.

Os quatro exemplos citados a seguir permitem uma análise sobre os aspectos fotointerpretativos oriundos da interação radar/vegetação.

No primeiro exemplo, que é uma área localizada no Parque Nacional de Brasília, nas proximidades da Barragem de Santa Maria, a vegetação de cerrado (sensu lato) está tipicamente representada e preservada nas unidades fisionômicas "cerrado" (sensu stricto) e "campo sujo". Em padrões tonais a forma "cerrado", vegetação de porte arbóreo-arbustivo, aparece nas imagens de radar com tons de cinza-claro, enquanto o "campo sujo" de estrutura graminóide, em tons de cinza-escuro. Logicamente, a densidade de cobertura foliar estaria influenciando parcialmente a resposta espectral, assim como a diferença no tipo de solo encontrado na área de cada uma destas comunidades vegetais. Em termos de textura fotográfica, o "cerrado" apresenta-se com uma textura média nas imagens de radar.

O "campo sujo" é visualizado com uma textura fina nas imagens, explicada possivelmente pela dominância do estrato graminóide quase seco e distribuído uniformemente sobre o solo. No caso de "cerrado", a textura pode ser explicada pela presença de estratos arbóreos, arbustivos que se alternam na estrutura fisionômica, além das áreas esparsas do estrato herbáceo com solo exposto. Por sua vez, a vegetação rasteira do "cerrado" perde a vitalidade (aspecto ou coloração pálida), enquanto nas espécies arbóreas

arbustivas tal fenômeno geralmente não ocorre. A diferença no sistema radicular destes grupos, e principalmente em relação à profundidade, tem influência na maior ou menor disponibilidade de água durante a época seca, e portanto, na vitalidade das espécies.

Esta mesma área verificada na imagem do sensor MSS/LANDSAT (canal 5), em termos de identificação, permite a mesma capacidade fotointerpretativa que aquelas obtidas pelas imagens do radar. Contudo, na área da unidade fisionômica "cerrado", a textura fotográfica nesta banda espectral, não permite relacionar uma diferença na estrutura desta forma vegetativa com os estratos arbóreos e arbustivos intercalados e dominantes. Neste caso, a textura pode ser definida como lisa, o que no radar foi definida como média, apesar da diferença de campos espectrais de trabalho dos sensores. Já no "campo sujo" de um mesmo nível de estrato na composição florística a textura foi igual para ambas as imagens MSS e SIR-A, ou seja, lisa.

No segundo exemplo, que é uma área localizada ainda na região do Distrito Federal e compreendida entre as Rodovias BR-070 e DF-6, tem-se uma área de reflorestamento (*Eucalyptus sp.*).

Na análise conjunta das imagens do canal 5 MSS e do radar pode-se perceber o incremento de área reflorestada no espaço de um ano, visto que as datas de passagens correspondem a 1980 e 1981 respectivamente. Com relação ao caráter espectral, na imagem do LANDSAT (canal 5), as áreas de reflorestamento podem ser identificadas por uma tonalidade cinza bem escuro e textura lisa, podendo-se deduzir o estágio adulto destes povoamentos, com exceção de pequena área com plantio pouco mais recente (tonalidade cinza-médio), onde os indivíduos florestais estão na fase jovem.

Na imagem SIR-A, os tons de cinza-claro são visualizados na área de reflorestamento; contudo a textura fotográfica apresenta-se mais ou menos mosqueada em função da diferença de idade de plantio, além das variações na cobertura foliar e da existência de alguns talhões com *Pinus sp.*

O terceiro exemplo mostra uma área com um extenso projeto agrícola, localizado nas proximidades do cruzamento da BR-251 com a DF-18. Esta área pode ser caracterizada por uma tonalidade de cinza bem claro, textura homogênea na imagem do canal 5 MSS, enquanto na imagem do radar a tonalidade é de cinza-claro. De acordo com a citação de Dellwig e Bare (1981) sobre o conceito de tom nas imagens, em que afirmam que esta característica fotointerpretativa refere-se ao nível de cinza, brilho ou obscuridade de um segmento da imagem, nas imagens de radar (SIR-A) os tons escuros correspondem aos alvos ou superfícies com pouco espalhamento da radiação incidente e com baixo sinal de retorno à antena, assim como os tons claros representam aqueles, altamente refletivos. Assim, as características tonais são similares nas imagens multiespectrais e de radar, mas às vezes podem coincidir. Estes autores exemplificam o comentário anterior mostrando uma área recentemente lavrada em solo úmido na fotografia multiespectral (tons bem claros) e na imagem de radar (tons bem escuros). O caso do terceiro exemplo pode ser considerado semelhante à situação descrita, observando-se entretanto que a umidade do solo preparado é variável na comparação entre o período da tomada da imagem do satélite (junho) e a imagem de radar (novembro).

No quarto exemplo, que é uma área situada no Chapadão dos Gerais (cruzamento entre as Rodovias MG-27 e BR-365), também de reflorestamento de *Eucalyptus sp.*, a imagem do canal 5 do MSS (agosto 76) permite visualizar, em gradações de cinza-médio, todo o povoamento florestal e em tons escuros as áreas de "cerrado denso", circunvizinhas. No canal 7 do MSS é nítida a identificação de uma queimada em área do cerrado para o posterior incremento deste reflorestamento. A identificação dos cerrados entre talhões é perfeitamente distinguível tanto no canal do MSS como na imagem de radar. Esta última, obtida em novembro de 1981, mostra uma ampliação espacial muito grande desta área e sobretudo deixa transparecer, pelo padrão textural médio (tons claros entremeados finamente com tons escuros), a quase homogeneidade do dossel deste povoamento, por ser um povoamento adulto e bem formado.

6. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Os sinais de retorno do radar SIR-A, traduzidos por assinaturas claras ou escuras e por texturas finas e rugosas, mostram que em regiões planas o critério de Rayleigh para espalhamento é adequado para explicar o comportamento diferente de solos preparados para cultivo em relação a solos com cobertura. Assim também a diferença na tonalidade observada entre a laterita capeadora e os metapelitos do Bambuí pode ser explicada pelo fato de que a primeira é uma superfície rugosa (lambertina) para o SIR-A, enquanto os metasedimentos comportam-se como uma superfície lisa (especular). Em regiões acidentadas a topografia controla a intensidade do nível de retorno, a partir da inclinação e do azimute das vertentes. Vertentes voltadas para a direção de iluminação mostram assinaturas mais claras, muitas vezes especulares quando o ângulo de incidência local se aproxima de 0° ; enquanto vertentes com ângulo de incidência local maior ($> 47^\circ$) mostram assinaturas mais escuras. Desta forma separam-se metapelitos arcoseanos e argilosos do Grupo Bambuí na região analisada.

Este controle que as vertentes exercem sobre o sinal de retorno deve ser considerado como do domínio do macrorrelevo. O controle da resposta de radar pelo critério de Rayleigh para espalhamento deve ser considerado no domínio do microrrelevo.

No domínio do microrrelevo os sinais de retorno formam padrões de imagem muito característicos para: reflorestamentos jovens (1 ano) e adultos (5 anos), solos preparados, solos ocupados com cultura (arroz, soja, etc), campo-cerrado, cerrado, cobertura laterítica, metapelitos, corpos d'água, feições urbanas (aeroporto, etc.), estradas (asfaltadas ou não), etc.

No domínio de macrorrelevo foram observados padrões de imagens específicos para: associações litológicas (ectinitos, granulitos, gnaisses, migmatitos, granitóides, kinzigitos, metassedimentos), estruturas dobradas (sinformes, antiformes), "trends" estruturais, falhamentos, fraturamentos, estruturas circulares, zonas de cisalhamento, zonas tectônicas, etc.

O valor do radar como ferramenta aplicada ao estudo de geologia estrutural é amplamente conhecido, embora o seu uso para identificação de unidades estratigráficas, permanece questionável. No caso da área investi

gada, usando as imagens de radar SIR-A na banda L, só foi possível a discriminação de algumas unidades estratigráficas, principalmente aquelas que apresentam expressão topográfica marcante, sendo que nas imagens MSS foram identificadas todas as unidades estratigráficas conhecidas na literatura geológica.

Os lineamentos geomórficos, correlacionados com falhamentos ou fraturamentos, são percebidos igualmente nas imagens MSS e SIR-A; no entanto certas direções são realçadas diferentemente nos dois sensores. Os lineamentos próximos às direções de iluminação dos sensores SIR-A ou MSS não aparecem ou ocorrem dissimulados; porém neste caso um compensa o outro. Disto resulta a importância da utilização de diversos sistemas de imageamento para maior segurança na interpretação geológica.

A análise da faixa imageada pela missão do Space Shuttle com as informações de radar, aliada àquelas obtidas com o sensor MSS/LANDSAT, vem demonstrar a capacidade individual de cada um destes produtos no estudo de vegetação, principalmente nas áreas de cerrado, reflorestamento, projetos agrícolas, além de outras aqui não mencionadas e discutidas como a mata seca de calcáreo e os campos de várzea, bem caracterizados em ambos os produtos.

Em termos de vegetação torna-se difícil afirmar a vantagem de um sensor ou outro, em razão sobretudo da diferença sazonal, além do ano de tomada das imagens. Contudo, pode-se salientar que as imagens do SIR-A, por operarem numa ampla faixa do espectro, trazem sem dúvida uma contribuição para este estudo, no qual dependendo da condição de estrutura da comunidade de vegetal, do tipo de solo e relevo, tem-se um detalhamento significativo, às vezes não alcançado quando se analisam as imagens MSS nos canais 5 e 7 isoladamente, considerando-se as faixas espectrais em que os dados são coletados. Em termos de visualização da distribuição espacial ocupada pelos diferentes tipos de alvos obtêm-se resultados idênticos com ambos os produtos.

7. BIBLIOGRAFIA

- BALIEIRO, M.G.; MARTINI, P.R.; SANTOS, P.R. Projeto SERGE: Dados de campo referentes ao experimento SIR-A no Brasil. São José dos Campos, INPE, Nov. 1983 (INPE-2973-NTE/210).
- BALIEIRO, M.G.; MARTINI, P.R.; SANTOS, J.R.; MATTOS, J.T. Projeto SERGE: Trabalho de campo referente ao experimento SIR-A no Brasil (Fase II). São José dos Campos, INPE, ag. 1984. (INPE-3259-NTE/223).
- DELLWIG, L.F.; BARE, J.E. SERGE - Shuttle experimental radar for geological exploration. Kansas, Center for Research, 1981. (Contract NAS7-100).
- INDA, H.A.V.; SCHORSCHER, H.D.; DARDENNE, M.A.; SCHOBENHAUS, C.; Haralyi, N.L.E.; BRANCO, P.C. de A.; RAMALHO, R. O craton do São Francisco e a faixa de dobramentos Aracuai. In: SCHOBENHAUS, C. Geologia do Brasil; texto explicativo do mapa geológico do Brasil e da área oceânica adjacente incluindo depósitos minerais, escala 1:250.000. Brasília, DNPM, 1984, cap. 5, p. 196-243.

- MENEZES FILHO, N.R. de; MATTOS, G.M.M. de; FERRARI, P.G. Projeto Três Marias; Relatório final. Belo Horizonte, CPRM, 1977, v.1
- MENESES, P.R.; PARADELLA, W.R. Síntese geológica preliminar da parte sul do Espírito Santo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 1., São José dos Campos, nov. 1978. Anais. São José dos Campos, INPE, 1982, v.2, p. 479-499.
- PFLUG, R. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas, na região de Diamantina, Serra do Espinhaço, Minas Gerais. Rio de Janeiro, DNPM/DGM, 1963 (Boletim 213), 1968.
- SABBINS, F.F. Geologic interpretation of space shuttle radar images of Indonesia. American Association of Petroleum Geologist Bulletin, 67 (11): 2076-2099, 1983.
- SABBINS, F.F.; BLOM, R.; ELACHI, C. Expression of San Andreas Fault Seasat Radar Image, In: JPL Radar Geology: An Assessment, Snowmass, CP, 1979. Workshop Report. Pasadena. JPL/NASA, 1980, p. 64-74 (JPL Publication 80-61).
- ULABY, F.T. Radar Signatures of Terrain: Useful Monitors of Renewable Resources. Proceeding of TM IEEE, 70 (12): 1410-1428, 1982.