



Revista Contexto GEOGRÁFICO

Universidade Federal de Alagoas - Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente
Programa de Pós-Graduação em Geografia
<http://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico>

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS IMAGENS RADAR DA AERONAVE DE SENSORIAMENTO REMOTO DO SIVAM E ÓTICA DO LANDSAT 7 ETM+

Melchior Carlos do Nascimento

Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente,
Maceió, AL, Brasil

melchior.nascimento@igdema.ufal.br

Péricles Cardim da Silva

CCSIVAM/SIPAM – Comissão para Coordenação do Projeto do Sistema de Vigilância da
Amazônia Setor Policial Sul Quadra 05, Bloco J, Cep 70.610.000 – Brasília – DF, Brasil

cardim@sipam.gov.br

RESUMO – O governo brasileiro decidiu, após detalhado diagnóstico, instalar uma grande infraestrutura de sensores que pudesse fornecer dados confiáveis da região amazônica. Esta infraestrutura é conhecida como Sistema de Vigilância da Amazônia – SIVAM. Entre os sensores previstos para entrar em operação em 2002, estão três aeronaves de sensoriamento remoto, na qual encontram-se instaladas um radar de abertura sintética (SAR), um imageador multispectral (MSS) e um sensor ótico e infravermelho (OIS). O presente estudo analisou a sinergia entre os dados SAR-Radar de Abertura Sintética e Landsat 7 ETM+ quanto a capacidade de distinção de alvos. Foram analisadas bandas individuais e compostas de ambos os sensores e os resultados foram avaliados de forma qualitativa e quantitativa. Os resultados indicaram que os dados SAR foram eficazes na discriminação de vários tipos de cobertura, especialmente nas polarizações XL, LHH e LHV em relação as imagens do satélite Landsat TM.

Palavras-chave: Polarização, análise de sinergia e composição de bandas.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN AIRCRAFT RADAR IMAGES SIVAM REMOTE SENSING AND LANDSAT OPTICS 7 ETM +

ABSTRACT – The Brazilian government decided, after detailed diagnostic, to install a great infrastructure sensors that could bring reliable data, about Amazon's Region. This infrastructure is known as Vigilance Amazon System – SIVAM. Among the foreseen sensors to enter operation in 2002, are three aircraft's remote sensing, in which meet itself installed a synthetic aperture radar (SAR), an multispectral imaging (MSS) and an optic and infrared sensor (OIS). The present study analyzed the synergy between SAR – Synthetic Aperture Radar and Landsat 7 ETM+ data for land use planning and occupation. Individual and composit bands of both sensors were analysed and the results were evaluated both qualitatively and quantitatively. Results indicated that the SAR data were effective in the discrimination of several cover types, especially XL, LHH e LHV polarizations and Landsat TM data or well.

Keywords: polarizations, analyzed the synergy, composit bands.

INTRODUÇÃO

As imagens de radar têm se mostrado cada vez mais úteis na caracterização remota de determinadas grandezas físicas dos mais diversos ambientes, objetos de investigação científica nos últimos anos. A capacidade de operação de imageadores ativos que operam na faixa de microondas, em particular o sensor Sistema de Abertura Sintética – SAR, no mapeamento da superfície terrestre em áreas com coberturas de nuvens, como por exemplo a região amazônica,

tem sido de grande importância, haja vista as limitações ao emprego dos sensores multiespectrais óticos sob tais condições meteorológicas.

Com o aumento do uso do SAR, muito se tem empenhado no desenvolvimento de novas técnicas de processamento de imagens radar, para fins de uso, ocupação e mapeamento do solo. Além disso, a necessidade de minimizar os fatores limitantes na distinção dos alvos, frente às imagens óticas, incentiva a pesquisa para um melhor refinamento dos resultados a serem gerados, a partir da interpretação de tais imagens. Por outro lado, a utilização de imagens óticas, já consagradas em inúmeras aplicações, por vezes é limitada por condições adversas do tempo e de visibilidade mencionadas, particularmente, na delimitação do uso da terra entre as áreas urbanas e rurais.

A análise e comparação entre essas imagens, visa obter uma melhor compreensão dos alvos, permitindo inferir sobre as diferentes propriedades dos mesmos, a despeito de que nas imagens óticas a interação na superfície de contato ocorre no nível de ressonância molecular, enquanto que nas imagens radar a resposta é condicionada à geometria e às magnitudes das grandezas dielétricas da superfície.

Neste contexto, o presente estudo teve como finalidade principal analisar a interação entre as informações adquiridas pelo Radar de Abertura Sintética embarcado na Aeronave EMB 145 SR e uma composição de imagem Landsat 7 ETM+, visando subsidiar o planejamento de uso e ocupação.

Assim sendo, a seguir são apresentadas as características do SAR e da região selecionada para análise, visando descrever os aspectos técnicos e fisiográficos, respectivamente. Posteriormente, são descritos os materiais e as técnicas utilizadas para tratamento e análise das imagens ótica e radar.

No caso das análises, a extração das informações específicas para o estudo comparativo devem subsidiar as interpretações subsequentes. O método de análise e comparação tomou como referência a classificação digital dos alvos nas imagens ótica e radar, confrontando-as e buscando evidenciar a sinergia entre as informações produzidas por elas. Finalmente, foram relacionados os aspectos relevantes, extraídos da análise e da interpretação, e apresentados os resultados alcançados, em consonância com o objetivo do trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

Localização e caracterização da área

A área de estudo selecionada para avaliação da capacidade de detecção dos alvos possui aproximadamente 48 km² (6 x 8 km) e está localizada na região do Vale do Paraíba Sul. O polígono limitante da região tem forma retangular, encontra-se circunscrito entre as coordenadas geográficas 22° 45' 11" a 22° 48' 59" de latitude sul e 45° 10' 50" a 45° 13' 52" de longitude oeste de Greenwich (Figura 1).

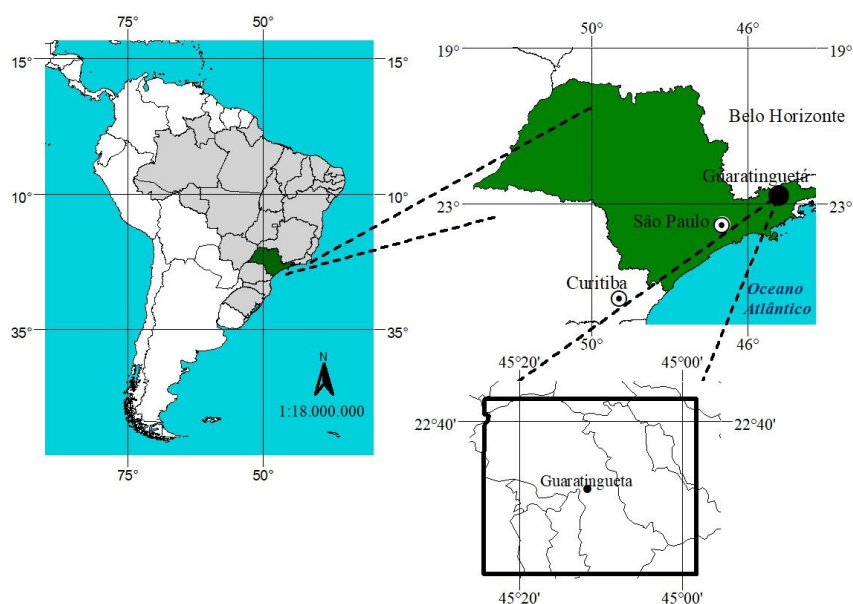
O clima é quente com inverno seco, com temperaturas médias variando entre a máxima de 35°C e mínima de 4°C. A maior incidência de chuva ocorre durante o período de março a junho, sendo sua precipitação anual da ordem de 1260 mm. A sua altitude varia de aproximadamente 100 m, nas margens do rio Paraíba do Sul, a 1.250 m, nos topos das cristas.

Com relação a sua geologia, a área de estudo situa-se dentro dos complexos Embu e Paraíba do Sul. Constituído no embasamento do Cinturão Móvel Atlântico, o Complexo Embu é formado, predominantemente, por gnaisses e migmatitos, originários de eventos tectônicos, da idade pré-brasiliana. No caso do Complexo Paraíba do Sul, os eventos tectônicos foram submetidos ao longo do período pré-cambriano, constituindo também, o embasamento do Cinturão Móvel Atlântico, do

qual isolou-se. Próximo ao Vale Paraíba do Sul, onde a catáclase é generalizada, dominam os milonitos, com estrutura de fluxo bem desenvolvida, comumente laminados ou bandados.

Sobre estas condições geológicas, são identificadas as unidades geomorfológicas na depressão do médio do Paraíba do Sul, incluindo as regiões Vale do Paraíba do Sul, Mantiqueira Meridional e modelados de acumulação fluvial. Assim como alguns trechos de depósitos sedimentares terciários e quaternários, desenvolveram-se latossolos terciários vermelho-amarelos e podzólicos vermelho-amarelos eutróficos.

Figura 1 – Localização da área de estudo:



A cobertura vegetal primitiva de floresta ombrófila densa hoje se acha descaracterizada pela ocupação humana, que passou a utilizar a maior parte da região para pastagens, culturas permanentes e cíclicas, bem como reflorestamento; há ainda setores de vegetação secundária sem palmeiras. Portanto, a área originalmente ocupada por remanescentes de floresta ombrófila densa, atualmente encontram-se descaracterizados pela ocupação humana, que passou a utilizar a maior parte da região com pastagens, lavouras permanentes e temporárias, bem como pela o cultivo da silvicultura.

Materiais utilizados

No presente estudo foram utilizadas imagens do sensor SAR (Synthetic Aperture Radar) da aeronave de sensoriamento remoto do SIVAM (Sistema de Vigilância da Amazonia), adquiridas na banda L, com combinações polarimétricas HH e HV, e na banda X, com polarização HH, as composições XL (L_HV – X_HH – L_HH) e L_HH,HV, todas com resolução espacial de 3 metros, adquiridas em março de 2001, tomadas simultaneamente, com ângulo de incidência 12 graus rasante em relação à pista de pouso, a uma distância média de 40Km entre a plataforma e a cena imageada, e a uma altitude de voo de 10.800 metros em relação ao nível médio do mar. A cena imageada abrange a cidade de Guaratinguetá, no Estado de São Paulo, incluindo a pista do aeródromo local e englobando a região do Vale do Paraíba do Sul com parte da Serra da Mantiqueira.

A imagem Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) usada consistiu nas faixas espectrais do visível (Banda 3: 630 – 690 nm) e infravermelhos (Banda 4: 780 nm – 900nm; Banda

5: 1550 nm – 1750 nm), na composição R5G4B3, com resolução espacial de 30 metros, tendo sido coletada em março de 2001.

A base cartográfica empregada foi a Carta Topográfica Digitalizada de 1:50.000, IBGE, 1982, Folha SF.23-Y-B-VI-4, Guaratinguetá-SP, assim como arquivos vetoriais digitais do Programa de Observação Espacial (POESIA/IBAMA), contendo dados de drenagem, malha urbana e estradas. A análise e o tratamento das imagens ETM+ e SAR foram realizados com uso do software Envi, versão 3.1.

CARACTERÍSTICAS DO SENSOR SAR

O radar corresponde a um dispositivo sensor que detecta a presença de um alvo a partir da faixa de microondas e mede sua distância até ele. Por ser ativo, gera a energia em microondas para iluminar a cena e registra os ecos provenientes das reflexões da cena sob a forma de uma imagem. A faixa de operação para radares imageadores compreende o intervalo de frequências entre 0.3 GHz a 300 GHz. O uso desse intervalo de frequências permite boas condições de transmissão de dados pela atmosfera. As bandas L, C e X são as mais usuais em radares imageadores.

No presente estudo, foram utilizadas as bandas X e L do SAR, com imageamento polarimétrico, cujas frequências e comprimentos de ondas variam entre: 5.750 a 10.90GHz e 5.20 a 2.75 cm; e 0.390 a 1.550GHz e 77.0 a 19.3cm, respectivamente.

Imageamento multipolarimétrico é o modo de operação em que o SAR adquire imagens simultâneas de uma mesma cena, distintas entre si pela polarização (orientação espacial dos campos elétrico e magnético), tanto na emissão quanto na recepção da radiação eletromagnética pelo radar, sendo quatro as combinações polarimétricas de interesse: horizontal/horizontal (H/H), vertical/vertical (V/V), horizontal/vertical (H/V) e vertical/horizontal (V/H).

Os radares imageadores são genericamente denominados de "radares de visada lateral" (SLAR – Side Looking Airborne Radar) devido a utilização de tal geometria de aquisição de dados, própria para o imageamento da superfície por meio de radar. Podem ser de dois tipos: Sistema Radar de Abertura Real (RAR – Real Aperture Radar) e Sistema Radar de Abertura Sintética (SAR – Synthetic Aperture Radar).

Os fundamentos que envolvem os sistemas de imageamento por radar estão, em sua maioria, relacionados com a energia transmitida pelos sensores radarmétricos e com as características de irradiação dos alvos da superfície terrestre. Os parâmetros mais importantes inerentes aos sistemas imageadores radar são a polarização, o ângulo de incidência e o comprimento de onda e, quanto à superfície imageada, a permitividade e a rugosidade.

Para se adquirir uma melhor resolução azimutal nas imagens de radar é necessário utilizar antenas mais longas ou de menores alturas em relação à plataforma do sistema de imageador. Para minimizar esta demanda, a engenharia de radar desenvolveu uma técnica que permite a criação de uma antena virtual, a partir da sucessão de sinais recebidos por uma antena real ao longo da linha de vôo. Esta antena virtual é chamada "antena de abertura sintética", formando a base do sistema SAR. O Radar de Abertura Sintética é, portanto, um radar imageador de visada lateral que emprega uma antena (abertura) de pequenas dimensões, que utiliza o deslocamento da plataforma (aérea ou orbital) e técnicas sofisticadas de processamento de sinal, para sintetizar uma antena de grandes dimensões.

O SAR é constituído de um radar, com as características de um radar convencional, com visada lateral, ou seja, o diagrama de irradiação da antena do radar é disposto obliquamente em relação ao

eixo definido pelo vetor velocidade da aeronave na qual esta instalada a antena. As aeronaves de Sensoriamento Remoto do SIVAM adaptadas para vôo de longo alcance, estão equipadas, entre outros instrumentos, com o Radar de Abertura Sintética (SAR), que consiste em um imageador destinado a atuar em regiões onde as características climáticas e meteorológicas não favorecem a utilização de sensores que operam nas faixas do visível e infravermelho. O referido equipamento tem alcance acima de 100 km e é capaz de realizar mapeamento nas bandas L e X, ambas com resoluções de 3 m, 6 m ou 18 m (Figura 2).

Para as resoluções mencionadas, o imageamento é feito com malhas de amostragem (distância entre pixels) de 2,5 , 5 e 15 metros, respectivamente, que multiplicados pelo total de 8.000 range gates, geram faixas com 20 km, 40 km e 110 km de largura, respectivamente. No caso do modo de 18 metros, a largura da faixa é limitada a 110 Km, devido ao padrão de irradiação da antena. A banda L produz quatro imagens simultâneas da mesma cena, segundo quatro combinações polarimétricas: horizontal/horizontal (H/H), vertical/vertical (V/V), horizontal/vertical (H/V) e vertical/horizontal (V/H). A banda X emprega a combinação H/H.

Figura 2 – Sensores SAR instalados na aeronave do SIVAM



Fonte: Fonseca, 2000.

CARACTERIZAÇÃO DO SATÉLITE LANDSAT 7 E SENSOR ETM+

O Landsat 7 consiste em um dos satélites do homônimo programa da NASA (National Space and Space Administration), lançado em abril de 1999 e que tinha a bordo o sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Operado pela NASA, as suas imagens são distribuídas pela USGS (United States Geological Survey). As imagens geradas pelo referido sensor possuem 8 bandas espectrais, sendo três delas na faixa do visível, quatro no infravermelho e uma delas pancromática.

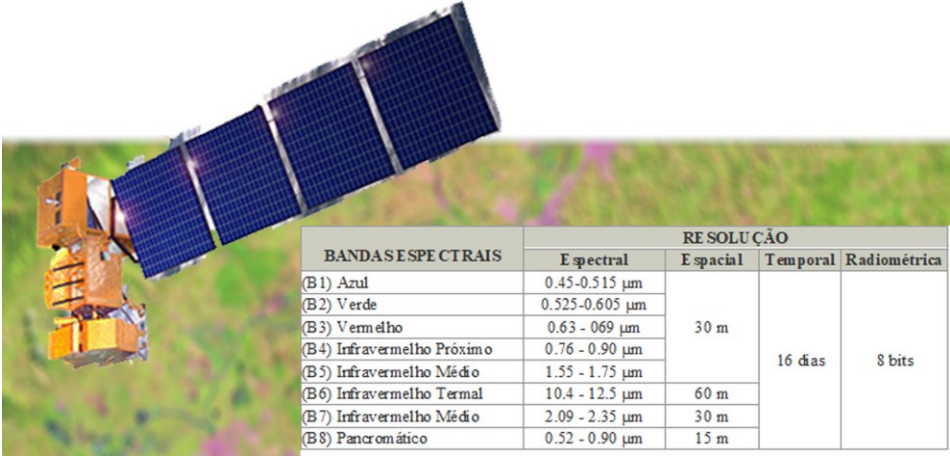
A área de aquisição de imagens se estendem desde 81° de latitude norte até 81° de latitude sul ao longo de todas as longitudes do globo terrestre. Uma órbita é realizada em aproximadamente 99 minutos, permitindo ao satélite dar 14 voltas da Terra por dia, sendo que a cobertura total do planeta Terra é completada em 16 dias. O imageamento ocorre no segmento descendente da órbita, e o satélite cruza a linha do Equador entre 10:00 e 10:15 (hora local) a cada passagem. O emprego da

órbita heliossíncrona permite que sobrevoo o local imageado no mesmo horário solar, deste modo facilitando a comparação de imagens multitemporais de uma mesma cena. O seu período de revisita era de 16 dias, sendo a área de imageamento correspondente a 185 x 185 km por cena.

A Figura 3 ilustra as principais características do sensor ETM+ do Landsat 7, destacando os limites de comprimentos de onda de sensibilidade das bandas espectrais. A banda Pancromática o diferencia dos demais satélites do programa Landsat, com resolução espacial de 15 metros. A banda Termal pode produzir informações com ganho baixo (Canal 6L) e com ganho alto (Canal 6H), permitindo opções de análise e aplicações, tais como a medição relativa de temperatura radiante ou o cálculo de temperatura absoluta.

O sensor ETM+ foi projetado para manter precisão radiométrica de aproximadamente 5% durante os 5 anos iniciais de sua operação. A qualidade da imagem de uma determinada cena e a avaliação da cobertura de nuvens são procedidas pela estação de recepção.

Figura 3 – Características do satélite Landsat 7 ETM+



BANDAS ESPECTRAIS	RESOLUÇÃO			
	E spectral	E espacial	Temporal	Radiométrica
(B1) Azul	0.45-0.515 μm	30 m	16 dias	8 bits
(B2) Verde	0.525-0.605 μm			
(B3) Vermelho	0.63 - 0.69 μm			
(B4) Infravermelho Próximo	0.76 - 0.90 μm			
(B5) Infravermelho Médio	1.55 - 1.75 μm			
(B6) Infravermelho Termal	10.4 - 12.5 μm	60 m		
(B7) Infravermelho Médio	2.09 - 2.35 μm	30 m		
(B8) Pancromático	0.52 - 0.90 μm	15 m		

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

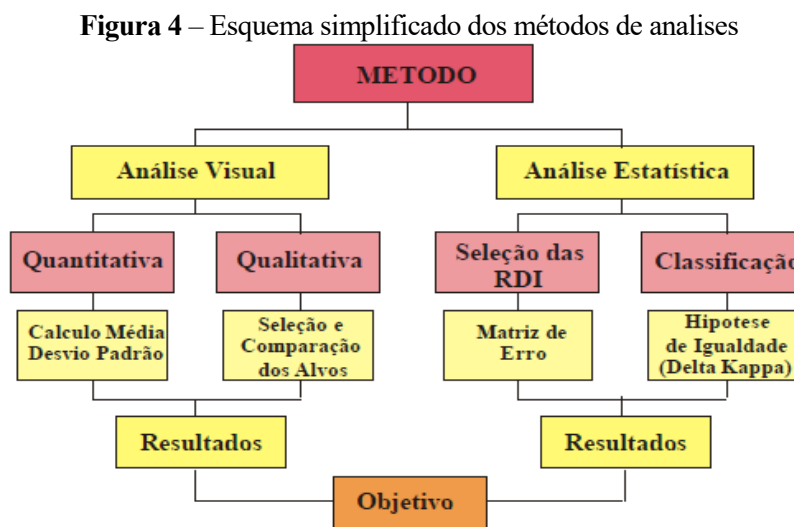
Os procedimentos utilizados contemplam duas análises distintas: uma visual e a outra estatística. Em cada uma delas os resultados relevantes são extraídos e ao final são comparados, visando evidenciar a sinergia entre as imagens SAR e ETM+.

A análise visual envolveu a seleção e comparação de um grupo de alvos de naturezas diferentes, buscando identificar a nitidez de cada alvo, em cada imagem radar e ótica analisada.

A análise estatística foi dividida em três etapas. Na primeira etapa foi realizado o cálculo da média e do desvio padrão, exclusivamente nas imagens SAR e nas suas composições, com objetivo identificar a que apresentou melhor resultado entre elas, relativo à resolução radiométrica. Na segunda etapa, foi feita uma classificação temática por pixel, em uma mesma área de interesse, nas imagens ótica e radar, visando calcular a acurácia da classificação em cada imagem, por meio de uma matriz de confusão ou erro.

Finalmente, a terceira etapa objetivou comparar os parâmetros que quantificam os resultados das classificações da etapa anterior (Kappa), visando evidenciar o nível de confiança dos classificadores e suas repercussões para extração da informação em cada imagem (Delta

Kappa). O esquema abaixo resume a método que foi seguido. A Figura 4 resume o método adotado no presente estudo.



Para representar em valores absolutos de acurácia das classificações foi automaticamente calculado o valor do Kappa da seguinte forma:

$$\kappa = \frac{\theta_1 - \theta_2}{1 - \theta_2} \quad \text{onde } \theta_1 = \sum_{i=1}^I \frac{x_{ii}}{N} ; \text{ e } \theta_2 = \sum_{i=1}^I \frac{x_{i+} \cdot x_{+i}}{N^2} \quad \text{onde } x_{ii}, \dots, x_{i+}, \dots, x_{+i}, \dots \text{ e } N \text{ e } I \text{ é o}$$

O critério para avaliação da classificação por meio do estimador de acerto Kappa pode ser assim mensurado: $K \leq 0,2$ Ruim; $0,2 < K \leq 0,4$ Razoável; $0,4 < K \leq 0,6$ Boa; $0,6 < K \leq 0,8$ Muito Boa; e $0,8 < K \leq 1,0$ Excelente. O parâmetro para verificar a igualdade ou não entre os Kappas é denominado Delta Kappa. O critério estabelecido indica que para um nível de confiança de 95% o Delta Kappa deverá ser maior ou igual a 1,96 ($Dk^* > 1,96$). Quando isto ocorrer, pode-se afirmar que os Kappas das imagens comparadas são diferentes. Caso contrário, ou seja, abaixo de 1,96, os Kappas são iguais. Inicialmente, é necessário se ter o conhecimento da variância do estimador do coeficiente Kappa. Esta variância pode ser calculada da seguinte forma:

$$\hat{\sigma}_k^2 = \frac{1}{N} \left[\frac{\theta_1(1-\theta_1)}{(1-\theta_2)^2} + \frac{2(1-\theta_1)(2\theta_1\theta_2 - \theta_3)}{(1-\theta_2)^3} + \frac{(1-\theta_1)^2(\theta_2 - 4\theta_3)}{(1-\theta_2)^4} \right], \quad \theta_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{x_{ij}(x_{j+} + x_{+i})}{N^3} \quad \therefore \quad \theta_3 = \sum_{i=1}^I \frac{x_{ii}(x_{i+} + x_{+i})}{N^2}$$

Sendo $\hat{\kappa}_1$ e $\hat{\kappa}_2$ os estimadores dos Kappas (k_1 e k_2 , respectivamente) de duas classificações diferentes, o teste de hipótese de igualdade de Kappas

$$H_0 : \kappa_1 = \kappa_2$$

$$H_1 : \kappa_1 \neq \kappa_2$$

é efetuado calculando-se a estatística

$$\Delta \hat{\kappa} = \frac{|\hat{\kappa}_1 - \hat{\kappa}_2|}{\sqrt{\hat{\sigma}_{\hat{\kappa}_1}^2 + \hat{\sigma}_{\hat{\kappa}_2}^2}}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise Visual

A análise comparativa da nitidez dos alvos foi feita com cada imagem isolada ou composta, incluindo a ETM+. A Tabela 1 consolida os resultados obtidos, considerando o critério crescente de 1 a 6 pontos para os alvos que aparecem menos e mais nítidos, respectivamente.

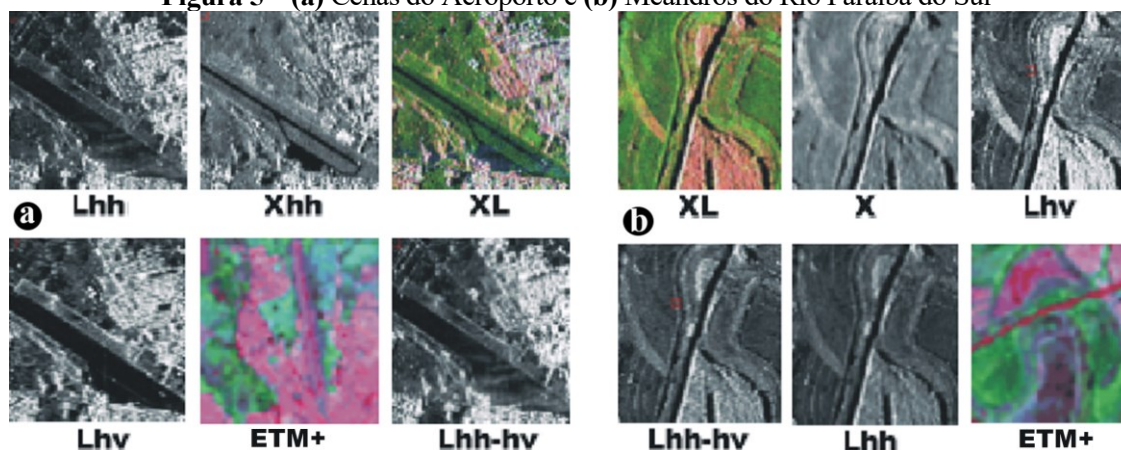
Tabela 1 – Resultado da análise comparativa da textura dos alvos

Descrição do Alvo	Banda X	Banda L			Bandas X e L	ETM+
	HH	HH	HV	HH - HV		
Aeroporto	5	2	4	3	6	1
Meandros dos rios	1	4	5	4	6	2
Edificações	2	3	4	5	6	1
Corpos d'água	6	1	3	2	4	5
Rede de alta tensão	2	5	3	6	4	1
Total	16	15	19	20	26	10

A composição XL obteve melhor resultado global, com destaque para a identificação do Aeroporto, dos Meandros e das Edificações. A composição LHH_HV alcançou o segundo melhor desempenho na detecção dos alvos, sendo considerado o segundo melhor resultado global, com destaque para identificação da Rede de Alta Tensão.

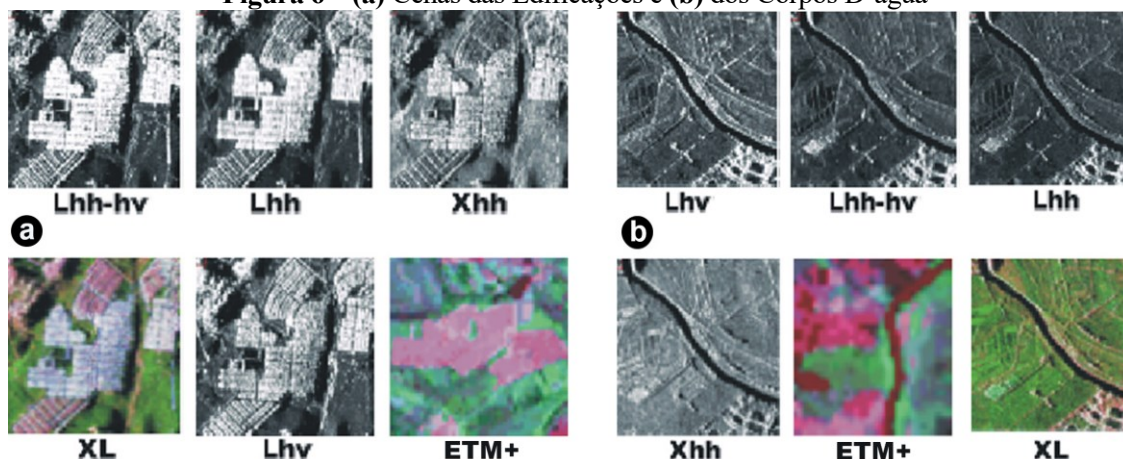
Analisando a Figura 5a é possível verificar que o aeroporto foi bem visualizado na banda X hh e na composição XL. Estas imagens permitiram uma melhor definição das bordas do aeroporto e sua pista de pouso e decolagem, bem como do pátio de estacionamento de aeronaves. A composição XL destaca-se pela boa definição das ações antrópicas, no entorno do aeroporto. Ainda observando a Figura 5b, pode-se constatar que os meandros do Rio Paraíba do Sul são melhores visualizados pela banda L hv e pela composição XL. Estas imagens permitem observar o trecho retifica do referido rio, haja vista a capacidade de penetração do radar. Da mesma forma, destacam-se na composição XL outros aspectos do relevo que, pelo ângulo de incidência de imageamento, apresentam-se mais evidentes.

Figura 5 – (a) Cenas do Aeroporto e (b) Meandros do Rio Paraíba do Sul



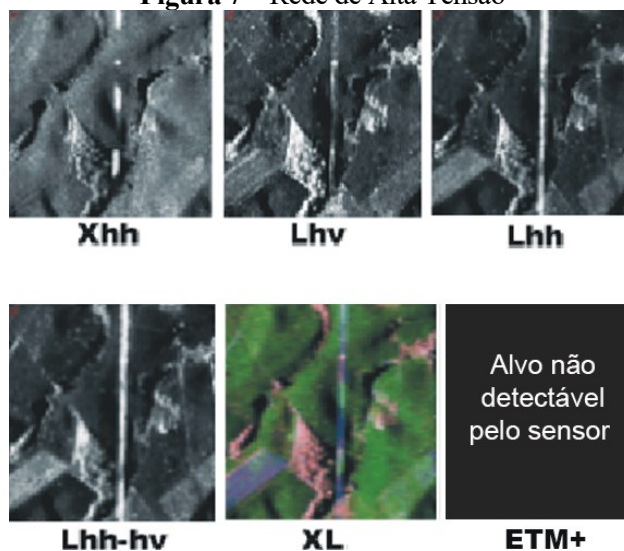
No caso das áreas edificadas, observando a Figura 6a é possível constatar que as imagens SAR apresentam maior detalhe das edificações, sendo detectado com considerada nitidez o contorno dos edifícios e das quadras. Entre as imagens SAR, os detalhes mencionados são mais perceptíveis nas composições XL e Lhh-hv. A composição XL discrimina com detalhes as sombras e a vegetação, que na composição Lhh-hv aparecem ambas em tom escuro. Analisando a Figura 6b, observa-se que a banda X hh representou os corpos d'água com destacada nitidez. A imagem ETM+ também apresentou excelente resultado, particularmente na identificação de pequenos corpos d'água. Portanto, nota-se um desempenho similar para esta classe temática.

Figura 6 – (a) Cenas das Edificações e (b) dos Corpos D'água



A análise visual foi baseada em uma avaliação qualitativa, onde considerou-se os padrões básicos de fotointerpretação a fim de evitar conclusões subjetivas sobre os alvos selecionados. Observando a Figura 7 é possível constatar a detecção da linha de alta tensão apenas nas imagens radar. Dentre tais imagens, verificou-se que a banda L, composições hh e Lhh_hv apresentaram maior nitidez e riqueza de detalhes. Na composição Lhh_hv o traçado da rede de alta tensão aparece com maior brilho e sem descontinuidade. Cabe ressaltar, que a imagem ETM+ não detectou o referido alvo, o que indica ser uma natureza de alvo imperceptível para imagens óticas de baixa resolução espacial.

Figura 7 – Rede de Alta Tensão



ANÁLISE ESTATÍSTICA

Cálculo do Desvio Padrão

De acordo com os resultados obtidos, a Banda L com polarização HV (Tabela 2) apresentou o maior desvio padrão e, portanto, mais riqueza de detalhes nas informações adquiridas. Da

mesma forma, a composição LHH_HV apresentou um bom resultado. As imagens que obtiveram os três melhores resultados nesta etapa da análise estatística foram as mesmas da análise visual, ou seja, XL, LHH_HV e LHV.

Tabela 2 – Resultado da média e desvio padrão das imagens SAR

Bandas	X	L		Multibandas	
Polarização	X hh	L hh	L hv	L hv + X hh + L hh	L hh + L hv
Média	92	65	91	82	77
Desvio Padrão	48	54	63	55	58

Ressalta-se que foram considerados, exclusivamente, os atributos radiométricos das imagens radar analisadas, sem levar em conta o potencial informativo associados às propriedades geométricas dos alvos, sobre as quais os parâmetros considerados nada podem informar.

CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS ÁREAS DE USO E OCUPAÇÃO

Nesta etapa da análise estatística foram realizados recortes em todas as imagens comparadas. Em seguida, e com base na imagem ETM+, os temas foram classificados da seguinte forma: Água (AGUA); Área Urbana e Degradada (AUD); Área de Florestas, Pastagens e Reflorestamentos (AFPR); e Áreas Alagadas (ALA).

Posteriormente, foram selecionadas as regiões de interesse (RDI) em cada imagem, observando uma proximidade de média de pixels para cada classe, visando evitar resultados discrepantes. A Tabela 3 consubstancia a classificação das imagens por tema, segundo os percentuais obtidos de acurácia (pixels classificados corretamente em cada tema). A classificação de 1 a 6 indica que a imagem que obteve melhor resultado é listada na linha 1 e o pior na linha 6.

Tabela 3 – Classificação das imagens por tema, segundo percentuais de acurácia

		Classes			
		ÁGUA	AUD	AFPR	ALA
Classificação	1 ^a	ETM+	ETM+	ETM+	ETM+
	2 ^a	Lhh_hv	XL	Lhh	XL
	3 ^a	Xhh	Lhh	Xhh	Lhh_hv
	4 ^a	Lhh	Lhh_hv	Lhh_hv	Lhv
	5 ^a	Lhh	Lhv	XL	Lhh
	6 ^a	XL	Xhh	Lhv	Xhh

As imagens assinaladas em cinza atenderam ao percentual mínimo de 60% de acurácia, para cada tema, identificando os resultados mais significativos. Verifica-se que, para visualização de corpos d'água, de área urbana e degradada e de áreas alagadas, a classificação nas imagens SAR e ETM+ apresentaram percentuais aceitáveis de acurácia, o que significa que nessas classes as informações podem ser comparadas com menor discrepância, para extração de informações. Já no caso das áreas de florestas, pastagens e reflorestamentos, a composição ETM+ contribui isoladamente, em bases aceitáveis, para melhor identificação dessas classes. Os resultados obtidos estão consolidados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado geral da classificação obtidos da matriz de confusão.

	Imagem	Acurácia	Coefficiente de Kappa
Classificação	1 ^a	Landsat ETM+	96,96%
	2 ^a	XL	64,66%
	3 ^a	Lhh_hv	60,91%
	4 ^a	L hh	54,25%
	5 ^a	L hv	51,60%
	6 ^a	X hh	50,77%

Estes resultados comprovam, inicialmente, que a classificação na imagem ETM 7 obteve um resultado excelente, o que é natural, haja vista que nas imagens óticas a interação ocorre a nível molecular, fornecendo uma resposta de pixel mais homogênea para uma mesma classe de alvos.

Desta forma, aplicando os conceitos acima formulados pode-se observar na Tabela 5 o resultado das comparações realizadas.

Na primeira etapa da análise estatística as imagens radarmétricas que obtiveram os melhores resultados foram a XL, a LHH_HV e a LHV, com destaque para esta última. Na segunda etapa a análise das classificações evidenciou que a imagem ETM apresentou superior grau de acurácia em comparação às imagens de radar. Ainda nesta etapa, verificou-se que entre as imagens de radar, as que obtiveram bons resultados foram as composições XL e LHH_HV.

Para avaliar a consistência dos resultados da segunda etapa foi realizado, na terceira etapa, o teste de hipótese de Kappa. Dos resultados obtidos verificou-se que as comparações isoladas na banda L, utilizando imagens com polarizações diferentes, e entre as bandas LHV e XHH, indicaram que suas classificações são similares, pois o Delta Kappa ficou abaixo do nível de confiança de 95%. Isto significa que pode-se utilizar qualquer uma dessas polarizações, e que o resultado, em termos de potencial informativo, será bem próximo.

Tabela 5 – Cálculo da hipótese de igualdade (Delta Kappa).

Classificação	kappa	Var. Kappa	Comparações	Delta Kappa	
Lhh	0,390111	2,86E-04	Lhh / Lhv	1,3916	iguais
Lhv	0,356788	0,000286954			
Lhh	0,390111	2,86E-04	Lhh / Xhh	2,0334	diferentes
Xhh	0,341501	0,000285033			
Xhh	0,341501	0,000285033	Xhh / Lhv	0,6392	iguais
Lhv	0,356788	0,000286954			
Lhh_hv	0,479536	1,53E-04	Lhh_hv / Lhv	5,8531	diferentes
Lhv	0,356788	0,000286954			
Lhh_hv	0,479536	1,53E-04	Lhh_hv / Lhh	4,2664	diferentes
Lhv	0,390111	2,86E-04			
Lhh_hv	0,479536	1,53E-04	Lhh_hv / Xhh	6,5965	diferentes
Xhh	0,341501	0,000285033			
Lhh_hv	0,479536	1,53E-04	XL / Lhh_hv	2,5457	diferentes
XL	0,530551	2,49E-04			
XL	0,530551	2,49E-04	XL / Lhv	7,5076	diferentes
Lhv	0,356788	0,000286954			
XL	0,530551	2,49E-04	XL / Lhh	6,0705	diferentes

Lhh	0,390111	2,86E-04			
XL	0,530551	2,49E-04	XL / Xhh	8,1828	diferentes
Xhh	0,341501	0,000285033			
ETM+	0,959535	3,78E-05	ETM / LHH	31,6223	diferentes
LHH	0,390111	2,86E-04			
ETM+	0,959535	3,78E-05	ETM / LHV	33,4480	diferentes
LHV	0,356788	0,000286954			
ETM+	0,959535	3,78E-05	ETM / XHH	34,3983	diferentes
XHH	0,341501	0,000285033			
ETM+	0,959535	3,78E-05	ETM / LHH-LHV	34,7648	diferentes
LHH-LHV	0,479536	1,53E-04			
ETM+	0,959535	3,78E-05	ETM / XL	25,3435	diferentes
XL	0,530551	2,49E-04			

No entanto, todas as demais comparações apresentaram um Delta Kappa acima de 1,96, indicando que, a despeito dos Kappas serem diferentes, o teste de igualdade para um nível de confiança de 95%, apresentou resultados acima de 1,96, o que significa que as classificações foram diferentes. Portanto, o resultado estatístico apresentado ratifica a contribuição e a sinergia entre imagens radar e ótica, constatadas anteriormente na análise visual.

Com isso, os analistas em geoprocessamento engajados em projetos ou pesquisas de uso e ocupação poderão extrair mais informações na medida em que dispuserem de imagens de radar e óticas, bastando, para tanto, combinar as respostas espectrais de cada tipo de imagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na análise visual, constatou-se que as imagens SAR foram efetivas na discriminação de alvos presentes nas áreas urbanas, de corpos d'água e do relevo em geral, com a composição XL obtendo o melhor resultado entre as composições SAR.

Na primeira etapa da análise estatística, no que tange ao potencial informativo associado unicamente à análise radiométrica, não-espacial das imagens, verificou-se que a banda L, com polarização horizontal-vertical, apresentou maior nível de contraste, indicando ter maior riqueza de detalhes.

Na segunda etapa da análise estatística constatou-se que a composição XL, seguida da composição Lhh-hv, obteve o melhor resultado entre as imagens SAR, haja vista que sua classificação obteve o maior coeficiente de Kappa. Este resultado respalda o resultado obtido na análise visual.

Nesta mesma etapa, constatou-se que a imagem Landsat ETM+ obteve o melhor resultado global, o que já era previsto, devido ao fato do classificador utilizado ser próprio para imagens óticas, o que maximiza o seu desempenho.

Finalizando, na análise estatística das classificações, ficou evidenciado, na terceira etapa, que não há contribuição relevante de informações quando compara-se, de forma isolada, as imagens Lhh – Lhv e Xhh – Lhv, pois o Delta Kappa ficou abaixo de 1,96, para um nível de confiança de 95%.

O estudo realizado demonstrou que há uma repercussão positiva na quantidade e qualidade de informações extraídas, a partir da combinação de uma composição da imagem Landsat ETM+ com as composições XL e Lhh_hv, das imagens do Radar de Abertura Sintética Aerotransportado do SIVAM.

REFERÊNCIAS

- AHERN, F. **Conceitos fundamentais do radar imageador, nível básico: Curso Pro RADAR**. São José dos Campos, 1995. 91p.
- ALLEN, C. **Interferometry Synthetic Aperture Radar**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, Newsletter, Sept., 1995, pp. 6-13.
- BRASIL/MME/PROJETO RADAMBRASIL. **Folhas SC. 24/25 Espírito Santo/Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: MME/RADAMBRASIL, 1983. p. 347-443 (Levantamento de Recursos Naturais. Vol. 30).
- CARRARA, W.; GOODMAN, R. S.; MAJEWSKI, M. **Spotlight Synthetic Aperture Radar: signal processing algorithms**. Artech House, Boston, 1995.
- FERNANDES, D. **Segmentation of SAR images with Weibull distribution**. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'98), Seattle, 1998, Proceedings.
- FERNANDES, D.; MASCARENHAS, N. D. A.; SAKANE, F. T. **Função espalhamento pontual em imagens de um radar de abertura sintética (SAR)**. V Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagem (SIBGRAPI'92), Águas de Lindóia, 1992, Anais, pp. 47-54.
- FERNANDES, D.; SAKANE, F. T.; MASCARENHAS, N. D. A. **Caracterização do "speckle" em imagens amplitude de um SAR**. VI SIBGRAPI, Recife, 1993, Anais, pp. 155-163.
- FERNANDES, D.; WALLER, G.; MOREIRA, J. R. **Registration of SAR images using the chirp scaling algorithm, IGARSS'96**. Nebraska, 1996, Proceedings, pp. 799-801.
- FONSECA, J. S. **Criação do Centro de Sensoriamento Remoto da Defesa**. Monografia. Rio de Janeiro, Escola de Comando e Estado-Maior da Aeronáutica, 28 ago. 2000.
- FONSECA, J. S. **Ver o que não pode ser visto**. In: Zoom. Revista do 1o/4o GAv. Fortaleza, 1o Esquadrão do 4º Grupo de Aviação, dez. 2001. a. XXIII, nº 26, pp. 40-45.
- FOODY, G. M. **On the compensation for change agreement in image classification accuracy assessment**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 6, n. 10, p. 1459-1460, Oct. 1992.
- HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. **Correct formulation of the Kappa coefficient of agreement**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 53, n. 4, p. 421-422, Apr. 1987.
- LEE, J. S.; JURKEVICH, I.; DEWAELE, P.; WAMBACQ, P.; OOSTERLINCK, A. **Speckle filtering of synthetic aperture radar: a review**. Remote Sensing Reviews. Vol. 8, 1994, pp. 313- 340.
- RAYTHEON COMPANY. **Airborne synthetic aperture radar subsystem specification**. Lexington, Raytheon Company, 26 jan. 1998. G628676. Rev. M.
- RAYTHEON COMPANY. **Critical item specification for multi-spectral scanner**. Lexington, Raytheon Company, 04 fev. 1999. G628700 Alt. 1. Rev. A.
- RAYTHEON COMPANY. **Optical and infrared sensor**. Lexington, Raytheon Company, 15 jan. 1998. G628677 Alt. 1. Rev. A.
- SANT'ANNA, S. J. S. **Avaliação do desempenho de filtros redutores de "speckle" em imagens de radar de abertura sintética**. Tese de Mestrado, INPE, 1995. Tauk, S. M.. Análise ambiental: uma visão multidisciplinar. Editora da UNESP, São Paulo, 1995.
- TOMIYASU, K. **Tutorial review on synthetic aperture radar (SAR) with application to imaging of the ocean surface**. Proceedings of the IEEE. V. 66, No. 5, 1978, pp. 563-584.