

ANÁLISE PRELIMINAR DE IMAGENS SAR POLARIMÉTRICAS E POTENCIAL DE APLICAÇÕES EM FLORESTAS TROPICAIS

Preliminary Analysis of Polarimetric SAR Images and Potential for Application in Tropical Forests

Emerson Luiz Servello¹
Tatiana Mora Kuplich¹
Yosio Edemir Shimabukuro²

¹Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRS/ INPE
Av. Roraima 1000 Caixa Postal 5021 - 97110-970 - Santa Maria, RS, Brasil
elservello@gmail.com
tmk@dsr.inpe.br

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Av. dos Astronautas 1758 - 12227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil
yosio@dsr.inpe.br

RESUMO

Dado o crescente interesse no monitoramento de florestas tropicais, este trabalho apresenta uma análise quantitativa de classes de uso e cobertura da terra em dados SAR complexos, com ênfase nas respostas espectrais e análise de composição colorida. Para isto, foram utilizadas as imagens do sistema SAR orbital RADARSAT-2, operante na banda C, na área da Floresta Nacional do Tapajós no Estado do Pará. Por meio de pontos GPS (Global Positioning System), obtidos em trabalho de campo, realizou-se a seleção de amostras das classes para geração de respostas polarimétricas (RP). As amostras forneceram pontos máximos e mínimos empregados nos cálculos da fração de polarização e coeficiente de variação para cada RP. Foram obtidos ainda os ângulos de elipticidade e orientação, para posterior simulação de imagens e análise de mudança em uma composição RGB aditiva. Os resultados para fração de polarização e coeficiente de variação demonstraram a proporção de radiação despolarizada e sua influência na intensidade do sinal ao mudar a polarização da onda. Em termos práticos, observou-se que a classe floresta apresentou pouca mudança ao variar a polarização da onda incidente, e as classes de agricultura e solo apresentaram uma grande variação. A análise de fase para cada classe não apresentou tendência nas distribuições. As composições coloridas permitiram realçar os pontos de mudança e visualizar as variações na intensidade do sinal, com base nos atributos da elipse de polarização obtidos das respostas polarimétricas. Sugere-se aplicação de algoritmos de classificação para verificar os efeitos da polarização na detecção de objetos.

Palavras chave: Floresta Amazônica, Polarimetria SAR, RADARSAT-2, Cobertura da terra.

ABSTRACT

Due to the growing concern about the monitoring of tropical forests, studies with a quantitative analysis of tropical land cover classes in orbital SAR complex data are needed. This work has the main focus on understanding SAR spectral responses and SAR images colour composition. The study area is the Tapajós Nation Forest and surroundings and remotely sensed data are RADARSAT-2 images, operating in C band. Global Positioning System (GPS) points, recorded in the field, allowed land cover sampling over the SAR images, for obtaining polarimetric responses (PR). Maximum and minimum digital values were recorded for the land cover samples, used for estimating coefficient of variation and polarization fraction. Additionally, ellipticity and orientation angles were derived and further used for simulating images and change analysis. Results showed the influence of depolarized returns in the signal intensity. Forest class showed little variation in digital values when polarization changed, although bare soil and agriculture classes presented high variation. Phase analysis for the land cover classes did not indicate any tendency. Color composites images allowed visualizing signal intensity variation, based on the polarization ellipse obtained from PR. For further work, it is suggested the SAR images classification to verify the polarization effects in tropical land cover detection.

Keywords: Amazon Forest, SAR Polarimetry, RADARSAT-2, Land Cover.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto por radar imageador emprega comprimentos de onda que não são sensíveis à cobertura de nuvens, e não dependem de radiação solar. Esta característica permite ao radar fornecer informações que auxiliam no mapeamento da superfície da terra e estimativa de parâmetros biofísicos da vegetação, como altura e biomassa (Imnhoff, 1995, Yanasse et al., 1997, Santos et al., 2003, Gama, 2007). Isto faz do radar imageador uma importante ferramenta em sistemas de monitoramento e detecção de mudanças para fins de controle do desmatamento e fiscalização ambiental.

O imageamento é realizado através do registro da radiação eletromagnética, na faixa das microondas, que é enviada, interage com os objetos na superfície terrestre e retorna ao radar (o retroespalhamento). Os componentes da cena, ou os objetos na superfície terrestre, têm a capacidade de despolarizar a onda incidente, sendo que o retroespalhamento contém informações sobre estes elementos. Por exemplo, em estudos da vegetação o retroespalhamento é influenciado pela orientação dos galhos, teor de umidade, presença de folhas e suas proporções nas camadas do dossel (Quiñones e Hoekman, 2004).

Outro fator importante no imageamento é o comprimento de onda utilizado. Os radares operam em comprimentos de onda que diferem quanto à penetração no dossel. Comprimentos de onda de menor penetração (maiores frequências) irão responder aos constituintes de camadas superiores do dossel, e uma radiação de maior penetração (menores frequências), aos elementos presentes no perfil estrutural da vegetação (Kuplich 2003). Então, a identificação das classes por meio de seu retroespalhamento está ligada a proporção dos elementos presentes na superfície da terra e o comprimento de onda empregado.

Modelar o espalhamento do sinal do radar em florestas tropicais consiste em entender a influência dos elementos presentes na cena, interpretar e extrair parâmetros das imagens (Leckie, 1998). Aplicações qualitativas e quantitativas, que utilizam SAR (*Synthetic Aperture Radar*), são pouco observadas em ambientes tropicais, devido à limitada disponibilidade de dados e da complexidade de tais ambientes (Hajsek et al., 2009). Nos estudos de parâmetros florestais com dados de radar é essencial a estimativa das estruturas verticais e horizontais da vegetação (Quiñones, 2002). As abordagens quantitativas, no entanto requerem um estudo prévio da onda espalhada usando técnicas de respostas de polarização e análises polarimétricas.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma análise quantitativa de classes de cobertura da terra

por medições radiométricas, com ênfase nas respostas espectrais e análise de composição colorida, empregando um sistema SAR orbital de banda C, na Floresta Nacional do Tapajós e arredores, no Pará.

1.1 Polarimetria

O sinal de retorno, chamado retroespalhamento, é registrado na forma de uma matriz [S] 2x2, composta de valores complexos, transmitida e recebida nas polarizações: HH, VV, HV e VH (Equação 1).

$$\langle S \rangle = \begin{bmatrix} \langle S_{HH} \rangle & \langle S_{HV} \rangle \\ \langle S_{VH} \rangle & \langle S_{VV} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde S é o espalhamento, HH polarização horizontal para transmissão e recepção, VV polarização vertical para transmissão e recepção, HV para transmissão horizontal e recepção vertical, e VH para transmissão vertical e recepção horizontal.

Em sensoriamento remoto por radar a representação do espalhamento da onda segue a natureza do sistema de coordenadas da radiação transmitida e/ou recebida. A forma usual foi proposta por Kennaugh (Woodhouse, 2006), em que a onda espalhada é descrita no sistema de coordenadas baseado na recepção da antena (BSA), também chamado retroespalhamento. A matriz de Kennaugh [K] é uma derivação da matriz [S], e representa o espalhamento no sistema BSA (Van Zyl et al., 1987). Este processo é descrito com detalhes em Touzi et al. (2004a).

A síntese de polarização consiste em gerar novas imagens a partir de uma radiação recebida e transmitida por um radar polarimétrico (Van Zyl, 1987). Independente da técnica de medição empregada para adquirir o dado, o conjunto de respostas do terreno, para uma combinação arbitrária de polarizações transmitida e recebida, pode ser sintetizada pela multiplicação da matriz de Kennaugh [K], por um vetor unitário, correspondente aos estados de polarização da antena (Van Zyl, 1987) (Equação 2). O vetor unitário da antena pode ser gerado com uma expressão nos termos de ângulo de Orientação (ψ) e ângulo de Elipticidade (χ) nos parâmetros de Stokes (Equação 3).

$$P(\chi, \psi, \chi_r, \psi_r) = g_r [K] g_t \quad (2)$$

$$\vec{g} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos(2\psi) \cos(2\chi) \\ \sin(2\psi) \cos(2\chi) \\ \sin(2\chi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde, P é a potência do sinal para os ângulos de ψ e χ , transmitidos e recebidos, g_r é o vetor de Stokes para a onda transmitida, $[K]$ é a matriz de Kennaugh, que representa o retroespalhamento na antena, e g_r é vetor de Stokes da onda recebida na antena (BSA).

A resposta polarimétrica (RP) é a representação de todas as potências possíveis (P) do sinal espalhado, nos valores de elipticidade e orientação da onda. O modelo de resposta polarimétrica é representado em um gráfico tridimensional (Figura 1). Para facilitar a interpretação das respostas, os gráficos são divididos em duas partes: co- e cross- polarizados (correspondentes às polarizações HH, VV e HV, VH, respectivamente).

O interesse na interpretação dos gráficos de RP (ou usualmente o par de respostas co- e cross-polarizadas) está no potencial de identificar e gerar imagens que maximizem, ou minimizem, os retornos polarizados ou despolarizados de áreas individuais (Evans et al., 1988). As novas imagens poderão realçar feições de classes de interesse, refinando classificações (Touzi et al., 2004b).

A importância em se obter as respostas polarimétricas está em descrever as propriedades de uma área ou objeto como uma função dos ângulos de Elipticidade (χ) e Orientação (ψ) (Figura 2). O ângulo de elipticidade é definido como a razão entre o arcotangente dos semi-eixos maior e menor da elipse de polarização, com ângulos positivos que representam a polarização à direita e ângulos negativos a polarização à esquerda (Zebker e Van Zyl., 1991). O ângulo de orientação é formado entre a linha do semi-eixo maior e o eixo horizontal.

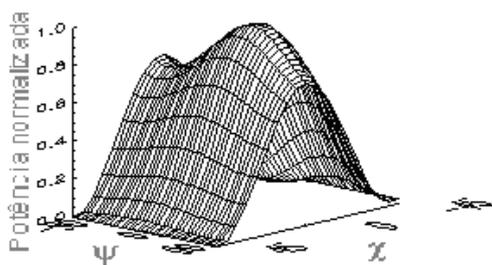


Fig. 1. Resposta polarimétrica normalizada em σ_0 (coeficiente de retroespalhamento), co-polarizada, de amostra de pastagem.

Dentre as informações contidas em uma RP, observa-se que para $\chi = 0^\circ$ e $\psi = 90^\circ$ ou -90° , a onda encontra-se com polarização linear horizontal (H), sendo que o eixo z apresenta a potência total refletida nesta polarização. Se $\psi = 0^\circ$, a onda encontra-se polarizada verticalmente (V). Nos ângulos de χ que tendem a -45° ou $+45^\circ$, a onda é dita polarizada elíptica à esquerda ou à direita, respectivamente. A observação das potências nos pontos angulares é um passo à síntese de polarização.

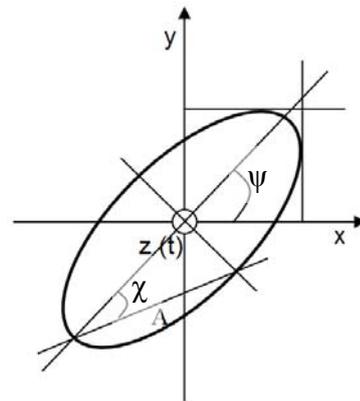


Fig. 2. Elipse de polarização de uma onda plana monocromática que se propaga nos campos x e y , cujos parâmetros variam de acordo com a elipticidade (χ), orientação (ψ) e amplitude (A), em um eixo de propagação $z(t)$. Fonte: Ulaby e Elachi, 1990.

O gráfico da RP apresenta um valor mínimo. Este valor define a “altura do pedestal”, ou seja, a proporção de radiação despolarizada registrada. A altura do pedestal foi associada por Gonçalves (2007), à composição florística de uma floresta tropical, obtidas por meio das RPs de um sensor na banda L. A variação de diversidade florística apresentou influência na altura do pedestal. Evans (1988) descreve o incremento no pedestal com o aumento do conteúdo de vegetação entre as classes agricultura e floresta.

O valor mínimo é igualmente empregado na geração de índices de polarização, como a fração de polarização, f_p . Kwok et al. (1994) citam a f_p como o descritor do grau de polarização da resposta. A f_p é obtida por meio da razão entre a diferença de respostas mínimas e máximas da resposta co-polarizada ($P_{\max} - P_{\min}$), e, a soma entre os picos e vales da resposta cross-polarizada ($P_{\max} + P_{\min}$), como mostra a equação 4. Quando $f_p=1$, a resposta média é polarizada e variações na polarização da antena (receber e transmitir, representados pelo vetor de Stokes) farão com que ocorra grandes mudanças na potência espalhada média. Quando $f_p=0$, o retorno médio é completamente despolarizado e variações na polarização da antena não causarão mudança na potência espalhada (Durdin et al., 1989). Esta informação permitirá, de antemão, atestar a viabilidade de se gerar imagens em outras possíveis representações de onda, conforme a proposta do conceito de síntese de polarização.

$$f_p = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (4)$$

Outras ferramentas de análise das respostas polarimétricas são citadas por Van Zyl et al. (1987), como o coeficiente de variação, v_u . Este, é uma maneira de quantificar a proporção do sinal que é despolarizado no sistema radar. Assume que a potência máxima que chega ao radar é polarizada, e a mínima é despolarizada (equação 5).

$$v_u = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (5)$$

O coeficiente combina a resposta polarimétrica de espalhadores individuais com a resposta para a classe. A citação da fração de polarização e do coeficiente de variação como parâmetros auxiliares na interpretação de RPs é abordada por Woodhouse (2006).

Assim como o conhecimento das respostas pode favorecer a discriminação dos alvos, sobretudo para uma posterior classificação, alguns cuidados são necessários. Entre eles deve-se lembrar que os gráficos não mostram informações de fase.

Outrossim, a resposta polarimétrica de um elemento de resolução, na imagem de radar, representa as razões de assinaturas de múltiplos objetos (Evans et al, 1988). Portanto, um mesmo objeto pode apresentar assinaturas diferentes (Boerner, 1998), assim como objetos diferentes podem apresentar respostas semelhantes.

2. MATERIAIS

Neste trabalho, foram utilizados dados do sensor SAR a bordo do RADARSAT-2, cujos parâmetros encontram-se descritos na Tabela 1. As imagens foram adquiridas no dia 24 de setembro de 2008 e correspondem ao modo ScanSAR.

TABELA 1. PARÂMETROS DO SISTEMA DE IMAGEAMENTO RADARSAT-2.

Características das imagens RADARSAT-2	
Banda/frequência	C/5,3 cm/5,6 Hz
Largura da banda	100 MHz
Polarização	Full (HH-HV-VH-VV e fase)
Resolução	25 x 28 m (quatro looks)
Largura da cena	25 x 25 Km
Ângulo de incidência	27,07°
n° de looks	1

O RADARSAT-2 foi lançado em setembro de 2007. Anterior a ele, as informações polarimétricas, ao nível orbital, na banda C, foram obtidas somente pelo SIR-C (Shuttle Imaging Radar), cuja missão teve curta duração. Portanto, as respostas polarimétricas disponíveis na literatura, para fins comparativos, são provenientes unicamente de sensores aerotransportados. As diferentes alturas de voo exercem influência nos ângulos de incidência e distorções ocasionadas pelo mesmo.

O trabalho foi desenvolvido na Floresta Nacional do Tapajós (FNT). Localizada ao sul da cidade de Belterra, no Pará, entre as coordenadas 55° 30' W a 54° 36' W, e 2° 30' S a 4° 18' S. Possui

limites definidos pelo rio Tapajós, a oeste, rodovia Santarém-Cuiabá (BR 163), a leste, e a Transamazônica no limite Sul. A Figura 3 apresenta a localização da FNT.

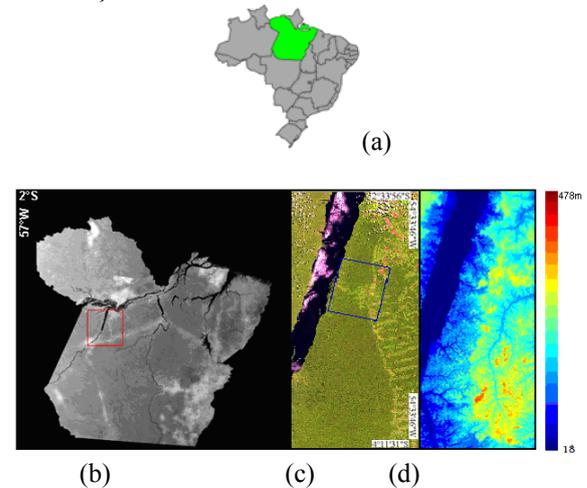


Fig. 3. Localização da área de estudo. Em (a) Brasil, (b) Estado do Pará, (c) composição colorida Landsat-5/TM 3R4G2B, com detalhe da área estudada em azul; e (d) o modelo de elevação da região.

A FNT possui regiões de floresta primária e outras já em sucessão secundária, afetadas pela ação antrópica. O desmatamento é uma prática observada na região. No interior da FNT está presente uma comunidade tradicional (vila São Jorge) cujos habitantes, assegurados pelo plano de manejo, realizam o corte seletivo da floresta, agricultura e pecuária. O entorno da FNT é caracterizado pela agricultura (soja, milho, sorgo e arroz) e pecuária com extensas áreas de pastagem. Em visita a área de estudos foi observada a ocorrência de áreas dominadas por babaçu (*Orbignya phalerata*), tucum (*Astrocaryum vulgare*), e paliteiros em áreas de pastagem (Servello et al., 2009).

A região apresenta um relevo predominante suave ondulado com a ocorrência de planícies às margens do rio Tapajós, e relevo acidentado ao sul (Figura 3d). O clima é característico de uma floresta tropical chuvosa, com temperatura média de 26°C e chuvas distribuídas ao longo do ano (regime pluviométrico anual de 1700 a 2000 mm). A estação seca vai de julho até dezembro e durante o mês de realização do trabalho de campo e aquisição das imagens ocorreram pancadas de chuva isoladas ao norte da FNT. Os dados climáticos da estação meteorológica de Belterra apontaram para ocorrência de precipitação na região durante o período de aquisição, como se observa na Figura 4. O pico de precipitação para o mês foi de 8 mm.

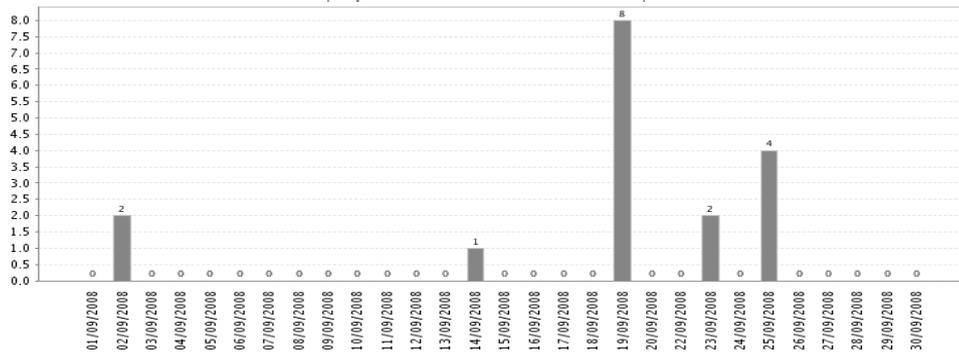


Fig. 4. Precipitação (mm) ocorrida ao longo do mês de setembro (dias) de 2008 no município de Belterra, Pará. Fonte: CPTEC/INPE.

3. METODOLOGIA

A análise das respostas polarimétricas inclui: (a) determinação do grau de heterogeneidade do espalhamento, (b) determinação da pureza da polarização do sinal de retorno por classe, e (c) determinação dos estados de polarização potenciais para a distinção de alvos da vegetação. Para tanto, a geração das RPs parte, inicialmente, da identificação das classes de cobertura/uso da terra. A alocação de pontos de campo foi obtida por GPS de navegação na área de estudo. A Figura 5 apresenta os pontos cujas RPs co- e cross-polarizadas, normalizadas em σ_0 .

Posteriormente, realizou-se a seleção dos valores máximos e mínimos apresentados por cada RP. Estes valores são empregados no cálculo da fração de polarização e coeficiente de variação, bem como possibilitam uma análise estatística das classes. Os resultados são apresentados de forma gráfica.

Identificados os valores citados, selecionaram-se os ângulos de elipticidade e orientação correspondentes a cada valor. Isto possibilitou a interpretação dos ângulos em função dos mecanismos de espalhamento e a otimização na identificação de classes por meio de síntese polarimétrica, descrita abaixo.

Para análise de fase, foi identificado o atributo de fase das imagens HH e VV da matriz de espalhamento [S]. Realizou-se a razão de fase das polarizações HH/VV que, com base em amostras, originou um gráfico polar com a representação de fase para cada classe. As amostras corresponderam aos pontos de amostragem para as RPs.

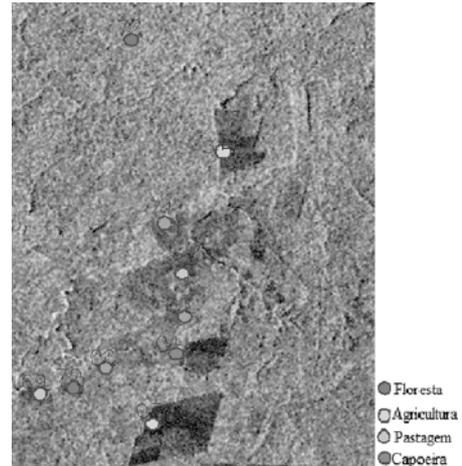


Fig. 5. Pontos amostrais para a tomada de assinaturas espectrais e alocação de algumas classes de cobertura do solo em imagem HH.

Por fim, realizamos a síntese de polarização para as imagens, simulando imagens e observando a variação das classes em função dos ângulos de elipticidade e orientação.

4. RESULTADOS

Com base em dados de campo, selecionamos seis classes de uso e cobertura da terra em área de floresta tropical: água, solo exposto arado, pastagem, agricultura, capoeira e floresta.

4.1 Respostas polarimétricas co- e cross-polarizadas

A Figura 6 sintetiza as RPs obtidas nas imagens RADARSAT-2. Cada RP representa as características de espalhamento presentes no alvo (Van Zyl et al., 1987). A Figura 6 ilustra respostas teóricas co- e cross- polarizadas. A forma gráfica da resposta para alvos naturais pode ser comparada à de alvos canônicos (com comportamento de espalhamento conhecido, como refletor de canto, por exemplo) quando se estuda a interação da onda. No entanto, há outros pontos a serem observados, como: (a) altura do pedestal, que define o quanto a radiação foi espalhada; (b) os mínimos e máximos da resposta, junto aos (c) ângulos correspondentes de elipticidade e orientação; e (d) o coeficiente de variação.

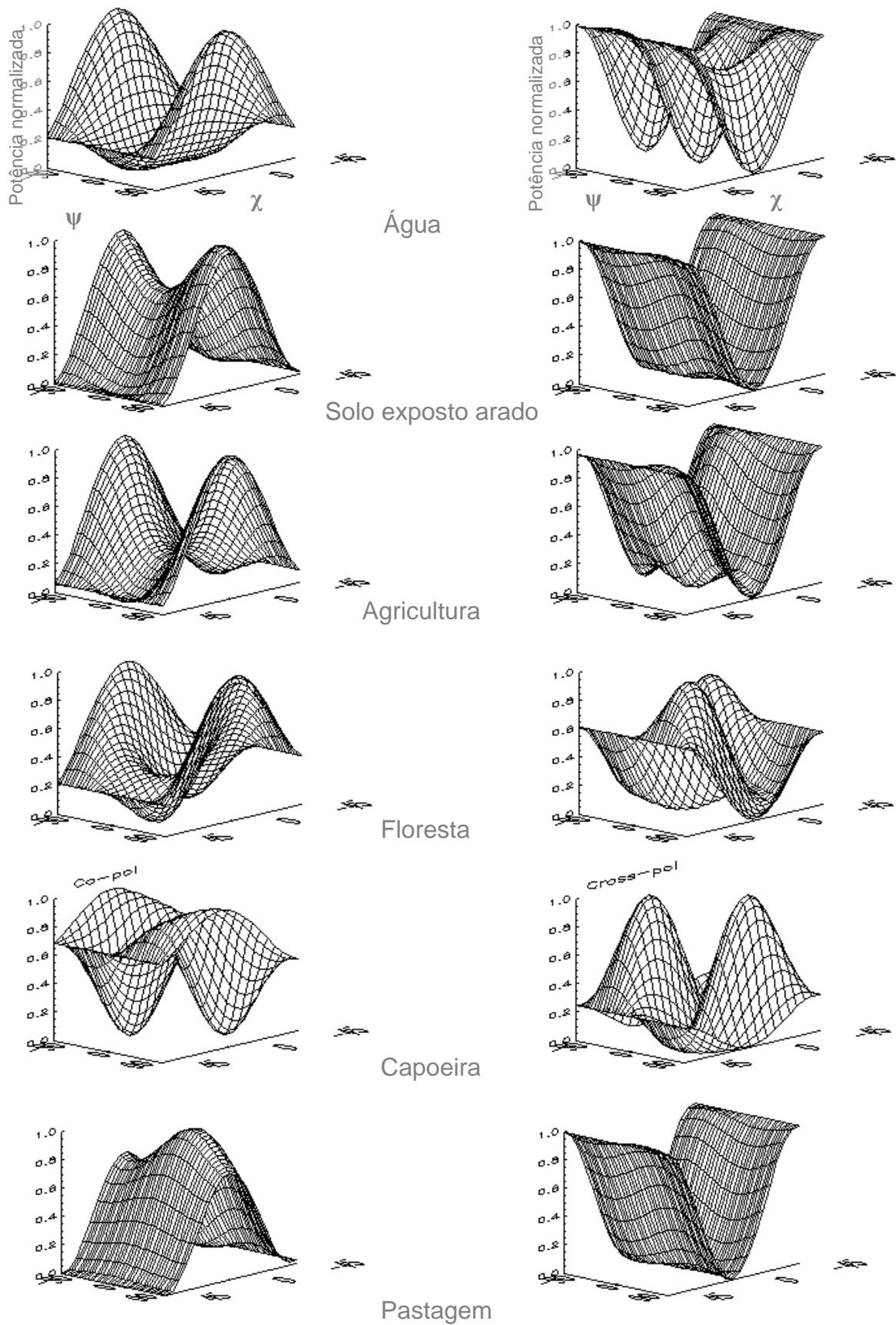


Fig. 6. Respostas Polarimétricas co- e cross-polarizadas para os objetos estudados.

Na Figura 6, nota-se para a classe água uma elevação no pedestal, que pode ser associada à despolarização da onda pela presença de ondas superficiais às margens do rio, ou a perda parcial da radiação por reflexão especular. A resposta de água apresenta picos co-polarizados com $\psi = 90^\circ$ e -90° e $\chi = 0^\circ$. Os sinais de mínima estão entre $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 45^\circ$ a -45° . A resposta cross-polarizada com valores máximos em $\psi = 90^\circ$ a -90° para $\chi = 45^\circ$ e -45° , ângulos que caracterizam os estados de uma onda polarizada circularmente à esquerda e a direita respectivamente. Quando $\chi = 0^\circ$, as máximas observadas estão em $\psi = -45^\circ$ e 45° . Para uma resposta mínima, há três vales em destaque para $\psi = 90^\circ$, 0° e -90° , com $\chi = 0^\circ$.

A RP do solo exposto não apresenta um pedestal, ou seja, a radiação recebida sofreu pouca despolarização em relação à radiação emitida pela antena. A pouca despolarização na resposta sugere que variações na representação da elipse de polarização (síntese de polarização) apresentarão significativa resposta na imagem resultante. A resposta mínima co-polarizada para a classe é observada nos ângulos $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° , no qual a resposta máxima é vista em $\psi = 90^\circ$ e -90° e $\chi = 0^\circ$. Para a resposta cross-polarizada observamos os picos em $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° , cujos vales encontram em $\psi = 90^\circ$ e -90° em $\chi = 0^\circ$. A resposta cross- apresenta-se inversa a resposta co-polarizada, mostrando semelhança à resposta de um alvo triédrico. A semelhança com a RP de um triédrico provavelmente está associada à orientação dos sulcos para plantio, paralelos ao sentido do imageamento, e à rugosidade superficial cujo comprimento de onda da banda C é sensível.

Entre as respostas polarimétricas de solo e agricultura foi notada uma semelhança no formato gráfico e nas respostas máximas e mínimas co- e cross-polarizadas. Entretanto, a resposta para a classe agricultura possui uma elevação no pedestal da assinatura. O fato foi atribuído a uma colheita recente, mantendo, no local, ramos e galhos da cultura. Portanto, associa-se o pedestal a despolarização da onda em função dos restos vegetais.

Quanto às respostas apresentadas pela classe floresta, seus valores de resposta máxima co-polarizados estão contidos nos ângulos de $\psi = 90^\circ$ e -90° para $\chi = 0^\circ$, e mínimos com $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 30^\circ$ e -30° . O formato gráfico se assemelha as respostas para classe florestal apresentada por Durden et al. (1989), usando banda L. A resposta cross-polarizada possui máximos e mínimos opostos ao assinalado na resposta co-polarizada, em que $\psi = 0^\circ$ para $\chi = 90^\circ$ e -90° apresenta os mínimos e $\psi = 30^\circ$ e -30° e $\chi = 0^\circ$ os máximos da RP.

Na sequência de RP, se observa as classes capoeira e pastagem. A primeira, a resposta máxima co-polarizada está em: $\psi = 0^\circ$ para $\chi = 0^\circ$, cujos mínimos são: $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° . A resposta cross-polarizada apresenta as máximas potências em: $\psi = 90^\circ$ a -90° com $\chi = -45^\circ$ e 45° , com mínimos $\psi = 90^\circ$ a -90° e $\chi = 0^\circ$. No tocante a resposta co- polarizada de pastagem, observa-se máxima intensidade em: $\psi = 90^\circ$ a -90° e $\chi = 0^\circ$ com mínima em: $\psi = 0^\circ$ e $\chi = 30^\circ$ e -30° . Os indicadores de máxima e mínima potência na RP cross-polarizada estão em: $\psi = -45^\circ$ e 45° com $\chi = 0^\circ$; e, $\psi = 90^\circ$, 0° a -90° com $\chi = 0^\circ$, respectivamente.

Ao separar os valores angulares ψ e χ para as respostas mínimas e máximas de um objeto qualquer, estabelece-se a possibilidade para se gerar novas imagens. O intuito do método foi proporcionar um contraste entre duas classes de uso do solo, empregando os parâmetros angulares anteriormente identificados.

Os picos e vales em dB de uma RP, para cada objeto, estão apresentados na Tabela 2. A resposta mínima é chamada altura do pedestal em que observamos o efeito da despolarização da onda incidente. Quanto maior a altura do pedestal haverá, do mesmo modo, um incremento na proporção de onda despolarizada no sinal de retorno. Como exemplo, podemos citar a vegetação, que contém um conjunto de elementos orientados, com a propriedade de despolarizar o eixo elétrico (Pairman e McNeill, 2003). Observa-se que há um aumento na despolarização da onda em função do incremento em vegetação nas classes. Este fato se destaca entre as classes solo – pastagem - agricultura - capoeira.

TABELA 2. INTENSIDADES DE RESPOSTA DO SINAL OBSERVADAS PARA AS CLASSES DE USO DA TERRA NAS RESPOSTAS POLARIMÉTRICAS. FRAÇÃO DE POLARIZAÇÃO E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO.

Classe	co-polarizado		cross-polarizado		<i>f_p</i>	<i>V_u</i>
	Máximo(dB)	Mínimo (dB)	Máximo(dB)	Mínimo(dB)		
Água	-20,42706	-30,55162	-18,52322	-31,25344	0,795	1,5300
Solo exposto arado	-3,85265	-12,85446	-1,97468	-13,19857	0,802	3,4258
Agricultura	-5,81537	-12,88572	-3,79453	-13,18828	0,753	2,2678
Floresta	-7,6370	-11,2679	-6,4906	-11,6493	0,704	1,5254
Capoeira	-7,88254	-14,88972	-7,10508	-15,05643	0,881	1,9101
Pastagem	-10,0191	-14,1121	-9,0722	-14,5154	0,752	1,4488

Estão também contidas na Tabela 2 as frações de polarização (f_p), obtidas a partir das potências mínimas e máximas das assinaturas co- e cross-polarizadas. A Figura 7 complementa os resultados obtidos para a fração de polarização. Pode-se observar que a classe Floresta apresentou uma maior proporção de onda despolarizada, atribuída a interação da radiação com o dossel florestal. A classe capoeira apresenta-se com um índice que melhor se aproxima de 1, com 0,88. Observamos que áreas com a presença de vegetação apresentam um pedestal elevado. No caso de corpos d'água, a despolarização é atribuída ao comprimento de onda da banda C, que é sensível as ondas superficiais, cuja geometria altera as propriedades da onda incidente.

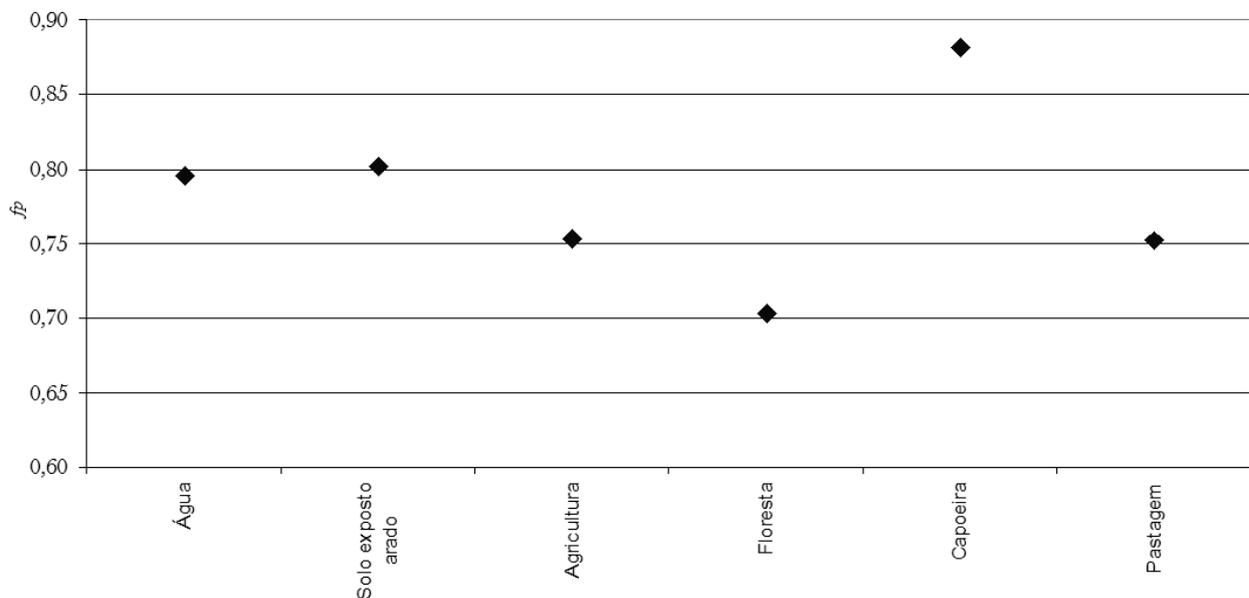


Fig. 7. Fração de polarização para as classes de uso e cobertura da terra.

A Tabela 2 apresenta os resultados para o coeficiente de variação (v_u) da imagem. Quanto menor o v_u mais efetiva se torna a influência dos diferentes espalhadores, no pixel, sobre a polarização da onda. Nos resultados obtidos destacam-se os v_u 's para solo exposto e agricultura, com valores de 3,4 e 2,3, respectivamente. Estes resultados sugerem que uma mudança na polarização ocasionaria uma mudança no espalhamento para as classes com vegetação. Os resultados para o v_u confirmam os apresentados anteriormente na f_p .

De modo geral, as f_p apresentadas para as classes indicam que a variação da orientação da onda trará um efeito na intensidade do sinal de retorno, haja vista que a maior porção de radiação recebida é de onda polarizada. Este efeito poderá ser mais bem observado na classe capoeira, cuja proporção de onda polarizada é de 0,8.

No entanto, alguns pontos na imagem poderão ser afetados pela porção de onda despolarizada, mas não se descarta a possibilidade da proporção de onda polarizada na radiação ser suficiente para discriminar objetos de interesse na superfície do solo.

4.2 Informação de fase

A distribuição da fase do sinal de retorno é abordada como uma ferramenta complementar na classificação de imagens SAR (Hess et al., 1995). A fase é uma medida angular definida como a diferença entre a onda recebida e a onda emitida do sinal num instante no tempo. A fase está ligada a geometria do objeto e sua capacidade em despolarizar a onda incidente. Cada objeto, ou constituinte da cena responde de maneira única à onda incidente. Neste sentido, a fase contribui na identificação do mecanismo de espalhamento dominante no objeto. Para os objetos/classes estudados podemos observar, na Figura 8, a distribuição da diferença de fase HH/VV.



Fig. 8. Diferença de fase HH/VV para os pixels amostrados por classe de uso da terra.

Objetos que apresentam alta variabilidade na diferença de fase impõem imprecisão nas classificações (Hess et al., 1995). Observa-se que na classe água a maior concentração de pontos encontra-se próximo a 0°, o que pressupõe o mecanismo de espalhamento superficial. Algumas outras classes

apresentam comportamento semelhante, como capoeira e solo. Em contrapartida, classes como floresta não apresentam um comportamento específico, com as diferenças de fase distribuídas ao longo de toda a circunferência.

A diferença de fase média é empregada para descrever os mecanismos de espalhamento predominantes em um determinado objeto. Um exemplo onde a fase média é igual a 0° , caracteriza o mecanismo de espalhamento superficial, citado anteriormente para a classe água. Do mesmo modo, quando a fase se encontra distribuída aleatoriamente entre 360° e 0° , o mecanismo de espalhamento predominante é o volumétrico. O espalhamento conhecido como de canto ou double bounce apresenta uma fase média concentrada em 90° ou 270° . Este último não foi evidenciado em nenhuma das amostras, no entanto é observado em determinadas regiões da imagem, como florestas próximas a corpos d'água.

4.3 Síntese de imagens SAR

As RPs fornecem atributos para discriminação e realce de classes, como os ângulos de elipticidade e orientação. Por meio destes é possível realizar a síntese da polarização da onda, simulando uma imagem (Zebker e van Zyl, 1991, Cloude e Pottier, 1996, Touzy et al., 2004a, Touzy et al., 2004b). A Figura 9 (a) apresenta uma composição em falsa cor em que R(VV) G(HV+VH/2) B(HH) para a imagem originalmente adquirida pelo sensor. As demais (Fig. 9 (b) e (c)) representam imagens com alteração na polarização da onda incidente.

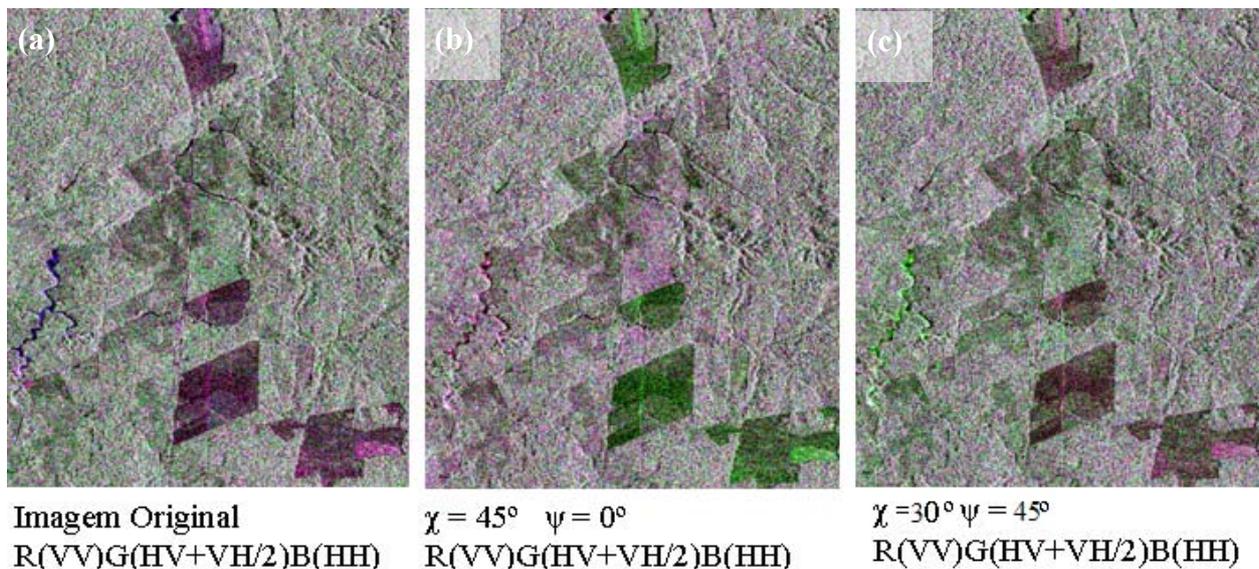


Fig. 9. Síntese de polarização com mudança de elipse da imagem original para imagens simuladas. (a) imagem original composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH), (b) imagem simulada $\psi = 0^\circ$ com $\chi = 45^\circ$, composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH) representando uma polarização elíptica a direita; e (c) imagem simulada $\psi = 45^\circ$ com $\chi = 30^\circ$, composição R(VV) G(HV+VH/2) B(HH) representando uma polarização linear a 30° de inclinação.

Nota-se, por uma análise comparativa, que certas áreas apresentaram mudança na intensidade do sinal de resposta ao variar a elipse da onda espalhada (através da mudança dos ângulos de elipticidade e orientação). A formação de cores empregando imagens de radar, neste trabalho, assume um modelo aditivo, em que o espaço de atributos RGB sofre combinações para gerar outras cores. Os vetores do espaço de atributos são os elementos da matriz de espalhamento. Esta composição colorida, da forma como foi apresentada, é conhecida como decomposição de Pauli (Lee e Pottier, 2009). Os elementos correspondentes são:

R: VV

G: (HV+VH)/2

B: HH

sendo: VV, VH, HV e HH a fração linear em uma resposta circular ou elíptica registrada segundo uma antena receptora de radar.

A contribuição de cada componente na definição da cor está relacionada aos espalhadores nas classes em estudo. Os efeitos ocasionados por meio da mudança de sistema, ou no mecanismo do espalhamento, podem ter fácil identificação empregando composições em falsa cor (Lewis e Henderson, 1998). Kasischke et al., (1997), apresentam o potencial das polarizações na classificação de uso e cobertura do terra, destacando, por exemplo, a identificação de áreas com floresta alagada na polarização HH. A vegetação florestal de área seca, em geral, destaca-se na polarização HV. Isto sugere a aplicação de um filtro de coloração verde à polarização HV, com o intuito de facilitar a identificação visual. Ou seja, na Figura 9, a variação na resposta da vegetação florestal em função da mudança de base é observada nas variações de tons de verde. No entanto, na Fig 9 (b), que apresenta uma polarização circular, a vegetação florestal responde com maior intensidade as polarizações paralelas, atribuindo uma coloração magenta. A vegetação agrícola apresenta uma maior

resposta nas polarizações cruzadas, nesta representação. Na Figura 9 (c), com polarização elíptica, a floresta se confunde nos tons de magenta e verde conforme os picos de sinal apresentado na RP. Áreas possíveis de classe capoeira aparecem em tons de verde. Áreas agrícolas se alternam no mesmo verde e magenta, no entanto em níveis de cinza escuros, cujo sinal mínimo para esta representação da onda foi evidenciado na RP anteriormente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentadas as respostas polarimétricas para diferentes usos e coberturas da terra em floresta tropical amazônica no Brasil, usando banda C orbital. As RP gráficas foram comparadas e permitiram a extração de informações quantitativas de valores máximos, mínimos e ângulos de elipticidade e orientação. Os valores mínimos e máximos foram empregados na fração de polarização, o qual permitiu observar o efeito da proporção da onda despolarizada na assinatura. O efeito de cada componente das áreas amostradas sobre a despolarização da onda puderam ser observados no coeficiente de variação das RPs, em que destacaram-se as classes solo exposto e agricultura. As informações de fase descreveram, para algumas classes, os mecanismos de espalhamento, e sua possível influência em uma classificação de imagens. De uma maneira geral, não foram observados comportamentos específicos para cada classe, apesar de tendências terem sido detectadas.

Este conjunto preliminar de análises foi empregado no entendimento das imagens sintéticas. A interpretação, empregando as variações de cor, permitiu a identificação de mudanças na intensidade do sinal. Os resultados antecipam a baixa discriminação entre as classes de estudo em abordagens de classificação automática. Entretanto, sugere-se a associação de técnicas de classificação polarimétrica ao uso da síntese de polarização.

AGRADECIMENTOS

Somos gratos ao CNPq pela bolsa de Mestrado para o primeiro autor. As imagens RADARSAT-2 foram obtidas em projeto submetido ao governo do Canadá. Agradecemos ao LBA (Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia) e EMBRAPA Cerrados (CPAC), na pessoa do Dr. Edson Sano, pelo apoio logístico nos trabalhos de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOERNER, W. M. Polarimetry in Radar remote sensing: Basic and applied concepts. In: Principles and applications of image Radar. **Manual of Remote Sensing**. Henderson, M. F; Lewis, A. J.

vol. 2, 3ª edição. Ed Wiley e sons, Nova York. p. 251–357, 1998.

CLOUDE, S. R.; POTTIER, E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 34, n. 2, p. 498-518, 1996.

DURDEN, S. L.; VAN ZYL, J. J.; ZEBKER, H. A. Modeling and observation of the radar polarization signature of forest areas. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 27, n. 3, p. 290-301, 1989.

EVANS, D. L.; FARR, T. G.; VAN ZYL, J.; ZEBKER, H. A. Radar polarimetry: Analysis tools and applications. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 6, p. 774-789, 1988.

GAMA, F. F. Estudo da interferometria e polarimetria SAR em povoamentos florestais de Eucalyptus sp. 2007. 243 p. (INPE-14778-TDI/1231). **Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto)** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

GONÇALVES, F. G.; Avaliação de Dados SAR polimétricos para Estimativa Volumétrica de Florestas Tropicais, 107 p., **Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)** - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2007.

IMHOFF, M. L. A theoretical analysis of the effect of structure on synthetic aperture radar backscatter and the remote sensing biomass. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, 33, p 341-352, 1995.

HAJNSEK, I.; KUGLER, F.; LEE, S. K. e PAPATHANASSIOU, K. P. Tropical-Forest-Parameter Estimation by Means of Pol-InSAR: The INDREX-II Campaign. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 47, no. 2, 2009.

HESS, L. L.; MELACK, J. M.; FILOSO, S.; WANG, Y. Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. Vol. 33, n. 4, p. 896 – 904, 1995.

KWOK, R.; RIGNOT, E. J. M.; WAY, J.; FREEMAN, A.; Polarization Signatures of Frozen and Thawed Forests of Varying Environmental State. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 32, nº 2, p 371-381, 1994.

- KUPLICH, T. M.. Estudos florestais com imagens de radar. **Espaço e Geografia**, vol. 6, no. 1, p. 71 – 96, 2003.
- KASISCHKE, E. S.; MELACK, J. M.; DOBSON, M. C. The use of imaging radars for ecological applications - a review. Elsevier. **Remote Sensing of Environment**, 59, p. 141–156, 1997.
- LECKIE, D. G. Forestry applications using imaging radar. In: Principles and applications of image Radar. **Manual of remote sensing**. Henderson, M. F.; Lewis, A. J. vol. 2, 3ª edição. Ed Wiley e sons, Nova York. p. 435 – 509, 1998.
- LEE, J. S.; POTTIER, E. **Polarimetric radar imaging: from basics to applications**. Ed. Taylor & Francis, 438 p., 2009.
- LEWIS, A. J.; HENDERSON, M. F. **Manual of remote sensing**. Henderson, M. F.; Lewis, A. J. vol. 2, 3ª edição. Ed Wiley e sons, Nova York. p 435 – 509, 1998
- PAIRMAN, D.; McNEILL, S. J. Improved Polarimetric SAR Classification by Application of Terrain Azimuth Slope Corrections. **IEEE Transactions on Remote Sensing**. P. 4468-4470, 2003.
- QUIÑONES, M.. Polarimetric data for tropical forest monitoring. Studies at the Colombian Amazon. **Ph.D. Thesis**. Wageningen University, The Netherlands, Wageningen University: 184 p., 2002.
- QUIÑONES, M.; HOEKMAN, D.H.. Exploration of factors limiting biomass estimation by polarimetric radar in tropical forests. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** 42(1): 86-104, 2004.
- SANTOS, J. R.; FREITAS, C. C.; ARAUJO, L. S.; DUTRA, L. V.; MURA, J. C.; GAMA, F. F.; SOLER, L. S.; SANTANNA; S. J. S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, 87, 482–493, 2003.
- SERVELLO, E. L.; KUPLICH, T. M.; SHIMABUKURO, Y. E.; SANO, E. E. Imagens polarimétricas RADARSAT-2 na discriminação de coberturas da terra na Floresta Nacional do Tapajós. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento. **Anais...** Natal, 2009. disponível em: <<http://sbsr.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.40.55/doc/7465-7472.pdf>>. Acesso em abril de 2009.
- SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A.; CASTRO-ESAU, K. L.; KURZ, W. A.; JOYCE, A. Monitoring carbon stocks in the tropics and the remote sensing operational limitations: from local to regional projects. **Ecological Applications**, 19(2), p. 480–494, 2009.
- SHIMABUKURO, Y. E.; DUARTE, V.; ARAI, E.; FREITAS, R. M.; LIMA, A.; VALERIANO, D. M.; BROWN, I. F.; MALDONADO, M.L.R. Fraction images derived from Terra MODIS data for mapping burnt areas in Brazilian Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, p. 1537-1546, 2009.
- TOUZI, R.; BOERNER, W. M.; LEE, J. S.; LUENEBURG, E. A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 3, p. 380–407, 2004a.
- TOUZI, R.; LANDRY, R.; CHARBONNEAU, F. Forest type discrimination using SAR polarization information. 2004b. Disponível em: <http://sof.eomf.on.ca/Biological_Diversity/Ecosystem/Cover/Case_Studies/Forest_Information/Documents/13093.pdf> acesso em janeiro de 2009.
- ULABY, F. T.; ELACHI, C. **Radar polarimetry for geoscience applications**. Norwood: Artech House, 1990. 364 p.
- VAN ZYL, J. J.; ZEBKER H. A.; ELACHI, C. Imaging radar polarimetric signatures: theory and observation. **Radio Science**, v. 22, n. 4, p. 529-543, 1987.
- VASCONCELOS, C. H.; NOVO, E. M. L. M. Mapeamento do uso e cobertura da terra a partir da segmentação e classificação de imagens – fração solo, sombra e vegetação derivadas do modelo linear de mistura aplicado a dados do sensor TM/Landsat5, na região do reservatório de Tucuruí - PA. **Acta Amazônica**, vol. 34(3) , 487 – 493, 2004.
- WOODHOUSE, I. H. **Introduction to active Microwave remote sensing**. Ed. Taylor and Francis. 370 p., 2006.
- YANASSE, C. C. F., SANTANNA, S. J. S., FRERY, A. C., RENNÓ, C. D., SOARES, J. V.; LUCKMAN, A. J. Exploratory study of relationship between tropical forest regeneration stages and SIR C-L and C data. **Remote Sensing of Environment** 59, Elsevier, Nova York. p. 180 – 190, 1997.
- ZEBKER, H. A.; VAN ZYL, J. J. Imaging radar polarimetry: a review. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 11, p. 1583-1606, 1991.