

Análise do potencial de imagem TerraSAR-X para mapeamento temático no sudoeste da Amazônia brasileira

César Edwin GARCIA¹, João Roberto dos SANTOS¹, José Claudio MURA¹, Hermann Johann Henrich KUX¹

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial de imagens SAR polarimétricas do sensor TerraSAR-X, no modo *StripMap*, para mapear o uso e cobertura da terra na região sudoeste da Amazônia brasileira. No procedimento metodológico imagens de amplitude nas polarizações A_{HH} e A_{VV} , $A_{<HH,VV>}$ derivada da matriz de covariância, bem como da entropia $A_{Entropia}$ derivada da decomposição de alvos por auto-valores fizeram parte, de forma individual ou combinada, do conjunto de dados investigados. Na classificação das imagens foram empregados dois classificadores: um baseado nas funções estatísticas de máxima verossimilhança (MAXVER); e outro, o método contextual (*Context*). Os resultados temáticos dessas classificações foram avaliados através da matriz de confusão e pelo índice *Kappa*. De forma sintetizada pode-se afirmar que as componentes $A_{<HH,VV>}$ e $A_{Entropia}$, têm significativa contribuição no procedimento classificatório, sobretudo pelo método *Context*, cujo desempenho alcançou com 78% de exatidão global e índice *Kappa* de 0,70.

PALAVRAS-CHAVE: mapeamento florestal, radar, classificação polarimétrica, Amazônia.

Analysis of the potential use from TerraSAR-X images for thematic mapping in SW Brazilian Amazon region

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the potential use of SAR polarimetric images from the TerraSAR-X sensor system, at *StripMap* mode, to map land use and land cover in SW Brazilian Amazon. Amplitude images at polarizations A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH,VV>}$, derived from the co-variance matrix, as well as the entropy $A_{Entropia}$, derived from the decomposition of targets by eigenvalues, are parts of the datasets investigated individually or in combined form. Two classifiers were used: the first is based on statistical functions of maximum likelihood (MAXVER), and the second is the contextual method (*Context*). The thematic results from these classifications were evaluated by a confusion matrix and by the *Kappa* index. Summarizing we can state that the components $A_{<HH,VV>}$ and $A_{Entropia}$, gave a significant contribution to the image classification procedure, considering specially the Context method, whose performance reached 78% of Global Accuracy and a *Kappa* index of 0.70.

KEYWORDS: Forest mapping, Radar, Polarimetric classification, Amazon.

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP, Brasil.
Email: {cgarcia, jroberto, hermann}@dsr.inpe.br; mura@dpi.inpe.br

INTRODUÇÃO

O conhecimento da dinâmica de uso e cobertura da terra exerce papel importantíssimo para entender os fenômenos resultantes da atividade humana que ocorrem em áreas tropicais, especificamente na região da Amazônia brasileira. A conversão da floresta em outras classes de uso da terra tem ocasionado excessiva fragmentação de habitats, perda de biodiversidade, degradação de solos férteis e redução da capacidade hídrica em certas zonas amazônicas. Face esses desequilíbrios resultantes da ação humana nos ecossistemas amazônicos, torna-se necessário um constante monitoramento da paisagem, conforme reportado por Houghton *et al.* (2000) e Vieira *et al.* (2004). Produtos de sensores remotos, em nível orbital, têm sido ferramentas adequadas para auxiliar no entendimento e monitoramento dessas áreas. Não obstante, sensores que operam na faixa óptica mostram limitações na aquisição regular de dados, devido à constante e elevada cobertura por nuvens no decorrer do imageamento, sobretudo em certos setores amazônicos, conforme citado por Asner (2001). Por conseguinte, imagens dos radares de abertura sintética (SAR) são, de maneira relativa quanto a operacionalidade do programa de imageamento, alternativas viáveis, devido a independência da aquisição em relação às condições atmosféricas das regiões tropicais (Henderson e Lewis 1998).

Há disponibilização de imagens SAR oriundas de diferentes frequências e polarizações, podendo-se citar: imagens do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS/PALSAR, banda L); do Radarsat-2 (banda C); do TerraSAR (banda X); e da constelação COSMO-SkyMed (banda X). O crescente interesse da comunidade técnico-científica em aprimorar ferramentas de tratamento desses dados SAR tem demonstrado suas aplicabilidades em: mapeamento do uso e cobertura da terra (Santos *et al.* 2008; Freitas *et al.* 2008); diferenciação entre estádios de sucessão florestal (Rignot *et al.* 1997; Neeff *et al.* 2005a); discriminação entre áreas de floresta primária, áreas desmatadas e de corte seletivo (Van der Sanden e Hoekman 1999; Saatchi *et al.* 1997); caracterização de respostas polarimétricas de florestas primárias e secundárias (Santos *et al.* 2009); estimativa de parâmetros biofísicos da tipologia florestal e sua biomassa (Kasischke *et al.* 1997; Hoekman e Quiñones 2000; Santos *et al.* 2002; Narvaes 2010).

Os sensores-radar apresentam algumas restrições quanto à utilidade para determinadas aplicações, de acordo com as características intrínsecas de operação, em razão da frequência e da polarização utilizada. No caso de estudos florestais, é importante conhecer qual é a frequência em que opera o radar e, por conseguinte, a capacidade de interação do sinal emitido com a estrutura da floresta (troncos, galhos e folhas). O comprimento de onda, por exemplo, é o parâmetro de maior

influência na capacidade de penetração do sinal de microondas no dossel florestal. Na banda X (2,4 cm - 3,75 cm), o pequeno comprimento de onda, praticamente não penetra no dossel e, portanto, o retroespalhamento ocorre na superfície, com as folhas e pequenos galhos formadores do dossel. Na banda C (3,75 cm - 7,5 cm) a penetração é um pouco maior e a interação se dá com folhas e galhos maiores formadores da copa das árvores do estrato superior. Nos comprimentos de onda maiores, caso das bandas L (15 cm - 30 cm) e P (77 cm - 136 cm), dependendo da densidade, estrutura da vegetação e umidade, o sinal de microondas emitido penetra o dossel, interage com toda e variada estrutura florestal e pode chegar até o solo (Leckie e Ranson 1998).

Dentro desse contexto, visando explorar a potencialidade de novos sensores SAR, o objetivo da presente pesquisa foi avaliar a aplicabilidade de imagens polarimétricas dual (HH e VV) do TerraSAR-X, no modo *StripMAP* para a identificação de classes de cobertura e uso da terra na porção SW da Amazônia brasileira. Para tal, técnicas de tratamento POLSAR, como a decomposição de alvos e de classificações, contextual e estatístico por máxima verossimilhança, foram empregadas para o mapeamento temático da região estudada.

Síntese teórica dos conceitos SAR e suas aplicações em estudos da tipologia florestal

A base teórica sobre as interações radar *versus* alvo foi convenientemente estabelecida a partir da década 80 (Ulaby *et al.* 1981; Ulaby e Dobson 1989). No caso específico da cobertura florestal, esta é representada numa imagem SAR, segundo Leckie e Ranson (1998), pela combinação das respostas geradas através dos diferentes mecanismos de espalhamento. Essas incluem a contribuição direta do solo, do tronco, da copa das árvores, da interação copa-solo e da reflexão dupla tronco-solo. A magnitude dos mecanismos de espalhamento decorrentes dos diferentes componentes é dependente dos fatores geométricos e das propriedades dielétricas da vegetação e do solo (Dobson *et al.* 1995). Comprimento de onda, polarização e ângulo de incidência do sinal controlam os mecanismos de espalhamento múltiplo, superficial e/ou volumétrico que expressam a resposta polarimétrica de alvos florestais.

Um radar polarimétrico permite extrair informações referentes à textura e ao brilho, obtidos a partir da magnitude, mas também, possibilita caracterizar os mecanismos de espalhamento do alvo. As características polarimétricas de um determinado alvo podem ser descritas por uma série de atributos extraídos da matriz de espalhamento complexa [S] (amplitude e fase), que constitui uma matriz [2x2] de dados complexos, contendo informações relativas ao alvo (Ulaby e Elachi 1990). Estes atributos podem ser divididos em “incoerentes”, referentes às medidas de potência do radar, e

“coerentes”, que fazem uso da informação de fase (Henderson e Lewis 1998). Entre os atributos incoerentes podem ser citados o coeficiente de retroespalhamento (σ_0), a razão de polarização paralela (R_p), a razão de polarização cruzada (R_c), a potência total (PT) e os índices biofísicos desenvolvidos por Pope *et al.* (1994), os quais visam aumentar a capacidade de caracterização de parâmetros florestais e o aproveitamento das diferentes polarizações adquiridas. Entre os atributos coerentes estão a diferença de fase ($\Delta\Phi$), a coerência polarimétrica (γ) entre as polarizações HH e VV, a entropia (H), a anisotropia (A) e o ângulo alfa médio, resultantes da decomposição por autovetores da matriz de coerência (Cloude e Pottier 1997), a magnitude (α_s) e a fase de Touzi ($\Phi\alpha_s$), ambas derivadas da decomposição por autovalor e autovetor da matriz de coerência [T], além do ângulo de orientação (ψ) e heliticidade (χ) e as componentes de espalhamento volumétrico (P_v), *double bounce* (P_d) e superficial (P_s), resultantes da decomposição de Freeman (Freeman e Durden 1998), na matriz de covariância [C].

A partir da matriz de espalhamento [S] pode-se gerar a matriz de covariância [C] e de coerência [T]. As matrizes de covariância e de coerência são unitariamente similares, carregando as mesmas informações, tendo os mesmos autovalores (que são reais), mas com diferentes autovetores (Cloude e Pottier 1996). A matriz de covariância ou de coerência corresponde a parâmetros de entrada para a decomposição por autovalor e autovetor (Cloude e Pottier 1997). Com base nesta decomposição obtém-se uma interpretação física dos mecanismos de espalhamento, através do conceito de entropia, anisotropia e do ângulo α . A Entropia (H) mede a quantidade de aleatoriedade (ou desordem) dos processos de espalhamento, o ângulo α é utilizado para descrever o tipo de mecanismo que rege o espalhamento e a Anisotropia (A) permite estimar a importância relativa dos diferentes mecanismos de espalhamento (Cloude e Pottier 1997).

A aplicabilidade dos dados SAR, quanto à relação e análise dos seus diversos atributos, decomposição de alvos e algoritmos classificatórios polarimétricos, tem um vasto campo científico: desde a questão de caracterização da tipologia florestal e mapeamento temático (Van der Sanden e Hoekman 1999; Santos *et al.* 2008); a questão de análise de respostas polarimétricas de alvos florestais (Mc Nairn *et al.* 2002; Santos *et al.* 2009); os estudos de parâmetros biofísicos para a modelagem volumétrica e de biomassa (Santos *et al.* 2002; Neeff *et al.* 2005a; Neeff *et al.* 2005b; Saatchi *et al.* 2007; Gonçalves *et al.* 2011); até o uso específico de classificadores polarimétricos no delineamento de classes de uso e cobertura da terra, como os trabalhos de: Freitas *et al.* (2008) e Guerra *et al.* (2010) ao fazerem uso do Iterated Conditional Mode – ICM; Cloude e Pottier (1997) ao empregarem atributos

coerentes no plano H/α ; e Rodrigues (2010) e Lim *et al.* (2008) ao utilizarem informação contextual.

MATERIAL E MÉTODOS

A área investigada está localizada no Município de Sena Madureira, Estado do Acre, entre os paralelos $9^{\circ}00'$ e $9^{\circ}45'$ S e meridianos $68^{\circ}00'$ e $68^{\circ}35'$ W (Figura 1). A formação vegetal predominante na região é a Floresta Ombrófila Aberta Submontana, com ocorrência ainda de Floresta Ombrófila Densa Aluvial com dossel uniforme. Face ao processo de conversão da floresta em atividades agropecuárias, ocorrem áreas de sucessão secundária, formadas pelo abandono de uso tradicional com o esgotamento da fertilidade do solo. O relevo é dissecado de topo tabular, com densidade de drenagem média e baixo grau de entalhamento dos canais (RADAMBRASIL 1978). As precipitações mensais mais baixas na região ocorrem em Junho e Agosto (50 mm), e as mais altas (270 mm) nos meses de Dezembro e Fevereiro (CPTEC 2010).

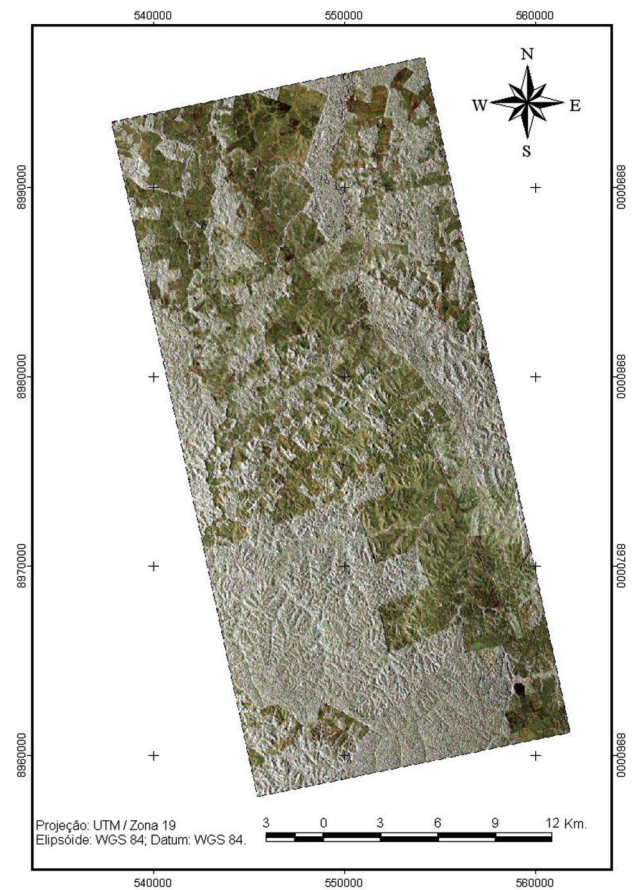


Figura 1 - Localização da área no município Sena Madureira (AC) observado em imagem TerraSAR-X.

No presente estudo empregou-se uma imagem SAR polarimétrica do TerraSAR-X (banda X) (Werninghaus e Buckreuss 2010; Pitz e Miller 2010), originalmente em formato *Single Look Complex* – SLC (Henderson e Lewis 1998), no modo de operação *StripMap* (Eineder *et al.* 2008), com passagem ascendente e data de imageamento realizada em 24/06/2009. Dentre as características dessa imagem SAR trabalhada têm-se: polarizações HH e VV, com resolução espacial de 1,124 m (*Range*) e 6,59 m (azimute), ângulo de incidência de 43,46° (*near*) e 44.61° (*far*) e faixa imageada de 36 km (azimute) e 16,6 km (*range*).

Na Figura 2a pode-se observar, de forma sintetizada, o fluxograma metodológico geral adotado nesse trabalho. Em uma primeira fase do trabalho constam as funções de pré-processamento dos dados TerraSAR-X (Figura 2b), onde se gerou a matriz de covariância, efetuou-se a decomposição de alvos e a geração das imagens-componentes para serem utilizadas no processo classificatório. Posteriormente foi realizada uma ortorretificação da imagem, seguida das classificações propriamente ditas, com as respectivas validações temáticas.

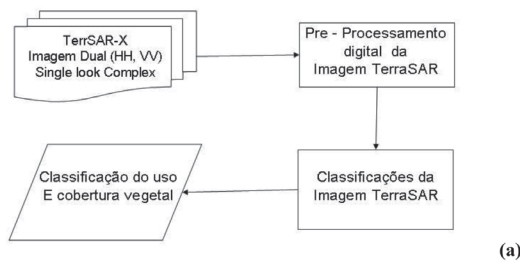
A imagem TerraSAR-X foi processada no *aplicativo PolSarPro 4.02* (<http://earth.esa.int/polsarpro/install.html>), gerando-se inicialmente a matriz de espalhamento $[S]_{2 \times 2}$. Como os radares de polarização dual não permitem a reconstrução da matriz de espalhamento $[S]$ completa, pode-se reconstruir uma coluna da matriz, gerando uma nova banda sintética (Cloude 2007). Isso é feito a partir das informações de fase das polarizações HH e VV da imagem original, obtendo-se assim, a componente HH.VV.

A matriz de covariância foi gerada aplicando-se uma média espacial e reamostragem de 2×5 sobre os elementos da matriz $[S]$ para que o espaçamento entre pixels na direção *range* e azimute ficassem aproximadamente iguais. Com o objetivo de reduzir o ruído *speckle*, aplicou-se uma filtragem nos elementos da matriz $[C_2]$, (C_{HH} , C_{VV} e $C_{<HH,VV>}$). Inicialmente foram testados alguns filtros (*Lee*, *Lee refined*, *Frost*) com diferentes tamanhos de janelas (3x3, 5x5 e 7x7). Considerando o desempenho dos mesmos, sem comprometer a resolução espacial final, foi então escolhido o filtro *J.S. Lee refined* (Lee *et al.* 1999), com tamanho de janela igual a 5x5.

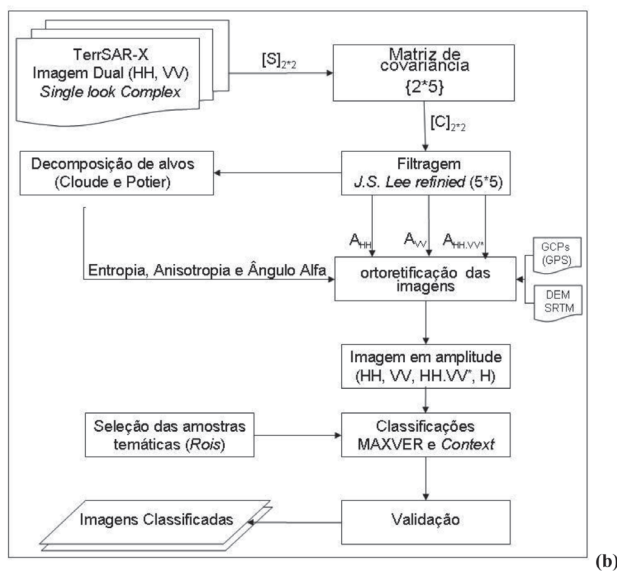
A partir da matriz de covariância $[C_2]$ filtrada, foram extraídos os parâmetros entropia (H), anisotropia (A), ângulo alfa (α) e o ângulo Beta (β) derivados da decomposição de alvos por autovalores e autovetores, utilizando o aplicativo *PolSarPRO*. É importante mencionar que a base conceitual da decomposição de alvos foi desenvolvida para dados SAR QuadPol (Cloude e Pottier 1997), podendo entretanto ser aplicada para dados de polarização dual (Cloude 2007), conforme anteriormente mencionado.

Os elementos da matriz de covariância (C_{HH} , C_{VV} e $C_{<HH,VV>}$), que representam dados em intensidade, foram transformados em dados de amplitude (A_{HH} , A_{VV} e $A_{<HH,VV>}$) aplicando-se a raiz quadrada desses elementos. Depois dos processos de média, filtragem e transformação para amplitude, esses dados através de uma análise de histogramas foram avaliados e considerados como tendo distribuição do tipo gaussiana, podendo então ser utilizados como imagens de entrada no uso de classificador baseado em máxima verossimilhança.

Para que as classes temáticas pudessem ser relacionadas espacialmente com os dados gerorreferenciados de campo, o conjunto de imagens-radar em amplitude foi ortorretificado, utilizando o módulo *OrthoEngine* do *software PCI Geomatics 10.3*. A modelagem escolhida foi o método *Radar Satellite Modelling*, o qual utiliza ao máximo as informações de efemérides do satélite, necessitando apenas de um número mínimo de 8 pontos de controle (GCPs) em conjunto com equações de colinearidade e coplanaridade e de um modelo digital de elevação (DEM). O DEM empregado foi derivado dos dados SRTM3 (http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/). Como resultado foi obtida uma



(a)



(b)

Figura 2 - Diagrama com a organização geral do trabalho (a) e procedimentos adotados nas etapas de pré-processamento e classificação (b).

ortoimagem TerraSAR-X derivada dos dados originais, apresentando um valor de RMS (*Root Mean Square*) de 2,69 metros.

Como o objetivo principal da presente pesquisa foi avaliar o potencial do TerraSAR-X para discriminar classes de uso e cobertura do solo em áreas tropicais, adotaram-se dois métodos de classificação: o primeiro, baseado em um classificador contextual (*Context*) e o segundo, em um classificador estatístico pontual por Máxima Verossimilhança - MAXVER.

A classificação contextual empregada fez uso do algoritmo de Gong e Howarth (1992), baseado na frequência e no valor de cinza do vetor-redução para a identificação das classes temáticas de interesse. Este algoritmo foi utilizado por Rodrigues (2010) e por Lim *et al.* (2008) em imagens ALOS/PALSAR em dados de amplitude (HH e HV) para mapear o uso do solo.

Por sua vez, o classificador MAXVER considera a ponderação das distâncias entre médias e a dependência espacial dos níveis digitais entre as classes, utilizando parâmetros estatísticos na classificação (Vieira 1996). Trabalhos empregando o classificador MAXVER com dados SAR foram realizados por: Rignot *et al.* (1997), ao discriminarem desflorestamentos e estágios de regeneração em floresta tropical; Saatchi *et al.* (1997) ao mapearem a cobertura do solo no Estado de Rondônia; Van Der Sanden e Hoekman (1999), no mapeamento de áreas florestais, de corte seletivo e de desflorestamento na Guiana e na Colômbia; Lee *et al.* (2001) ao discutirem a capacidade do classificador de Máxima Verossimilhança na discriminação do uso e cobertura da terra, utilizando dados polarimétricos *full*, *dual* e *single*, comparando-o ao classificador de Wishart.

Para utilizar o classificador contextual o primeiro passo foi aplicar uma conversão nas imagens amplitude de 32 *bits* para 8 *bits*, processo esse realizado através do algoritmo *Scale* (PCI *Geomatics*). O segundo passo foi a geração de uma imagem redução, no qual um conjunto de imagens é reduzido para uma imagem de uma dimensão, com perda relativamente pequena da informação. A redução foi então realizada usando-se o algoritmo *Reduc* (Gong e Howarth 1992). Neste processo foram testados vários conjuntos de produtos, tais como: a) todas as imagens, (A_{HH} , A_{VV} , H), (A), ângulo alfa e $A_{<HH, VV>}$; b) conjunto A_{HH} e A_{VV} ; c) conjunto A_{HH} , A_{VV} e H ; d) conjunto A_{HH} , A_{VV} , H e A . Nessa análise prévia verificou-se que o melhor resultado foi obtido com o conjunto (A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH, VV>}$ e H) e sobre esta imagem-redução aplicou-se o classificador contextual *Context* (Gong e Howarth 1992). Ao mesmo tempo dessa análise prévia, verificou-se que os atributos incoerentes de anisotropia (A) e ângulo alfa, bem como a informação de fase relativa contida no dado PolSAR, não forneceram ganho de

informação suficiente para distinguir classes com significância desejada. Para a classificação MAXVER foi também usado o mesmo conjunto de imagens em amplitude (A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH, VV>}$ e H) da utilizada na classificação *Context*.

As amostras de treinamento e validação empregadas nas classificações foram selecionadas a partir dos dados levantados em campo. Esse trabalho de campo constou do inventário florestal de 12 *transectos*, com mensuração de variáveis dendométricas e de identificação botânica, o que permitiu a caracterização fisionômico-estrutural da tipologia florestal. Adicionalmente, foram coletados 189 pontos de observação georreferenciados com a descrição das unidades de uso e cobertura da terra. Com base nessas informações foi estabelecida uma legenda com seis classes temáticas: floresta ombrófila aberta (primária), capoeira (sucessão secundária), pasto sujo, pasto limpo, solo exposto e corpos d' água.

Após a aplicação das duas abordagens classificatórias acima citadas, realizou-se uma fase de pós-classificação. Esta consistiu em aplicar um filtro de moda (9x9) para reduzir o aspecto ruidoso dos dados temáticos resultantes dessas classificações.

Para analisar a separabilidade das classes foi calculada a distância estatística JM, conforme Richards e Jia (1999), medida essa efetiva para definir diferenças entre amostras representativas de determinados temas em imagens de satélite. Segundo este índice as amostras com maior semelhança apresentam valores próximos a zero (0); conseqüentemente, os valores próximo a dois (2) correspondem àquelas com maior diferenciação de resposta. Além disso, a partir de pontos-testes de observação definidos na etapa de campo foi realizada a validação do desempenho das classificações, calculada através do grau de exatidão total e a exatidão por classes, decorrendo assim o índice de concordância *Kappa* (Landis e Koch 1977). Gráficos do tipo *box-plot* foram igualmente empregados para validar o desempenho do conjunto de imagens.

Por último, a partir dos valores de *Kappa* encontrados para cada classificação (MAXVER e *Context*), foi realizado um teste estatístico Z para verificar, numa combinação dois a dois, se havia diferença significativa entre os resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na região sudoeste da Amazônia, uma agricultura de subsistência (para produção de arroz, mandioca, feijão, milho) ocupa geralmente áreas das pequenas propriedades rurais, juntamente com a criação de pequeno lote de bovinos. Por outro lado, ao longo da estrada (BR 364) que liga Sena Madureira - Rio Branco e em suas vicinais, nota-se que houve forte conversão da floresta ombrófila aberta em extensivas áreas de pastagens, muitas delas em relevo dissecado de topo tabular. Áreas de floresta degradada por exploração madeireira, de médio e baixo impacto, foram também observadas no

decorrer do trabalho de campo, bem como um baixo número de áreas de sucessão secundária (capoeiras), decorrentes do abandono da área após tradicional uso agrícola e/ou pecuário e conseqüentemente, com perda da fertilidade do solo. Áreas de pastagem bem manejadas (pasto limpo) e outras com presença de espécies invasoras arbustivas e palmeiras espacialmente esparsas (pasto sujo) fazem parte da paisagem. O tema solo exposto identificado correspondia a áreas de agricultura em preparação para o plantio, ou em pousio.

O conhecimento fisionômico-estrutural e florístico é importante para os estudos da tipologia florestal com base em dados SAR, pois não somente permite categorizar cada tipologia florestal em estudo, como também entender a resposta polarimétrica e o mecanismo de espalhamento predominante entre o sinal-radar com o alvo florestal, conforme relatado por Santos *et al.* (2009). Por isso, foi executado o inventário florestal na presente pesquisa, com mensuração e identificação botânica de 1048 árvores (DAP > 10 cm em amostras de ¼ hectare para floresta e DAP > 5 cm em amostras de 1000m² para capoeira) cuja síntese de informações está contida na Tabela 1.

Numa análise exploratória, pode-se observar na Figura 3 os gráficos do tipo *box-plot* que mostram o comportamento polarimétrico do conjunto de dados TerraSAR-X de cada classe temática, com as representações dos parâmetros descritivos do primeiro e terceiro quartil, além da mediana. As polarizações duais HH e VV, de maneira individualizada, mostraram-se

limitadas para separar as diversas classes de uso e cobertura da terra. Levando em conta as componentes combinadas <HH, VV*> e Entropia (H) nota-se uma maior diferenciação entre as classes.

Tabela 1 - Número total de indivíduos (N), espécies (s), famílias (F) e espécies de cada parcela amostral do IF, com os respectivos valores do índice de Shannon-Weaver (H') e equabilidade de Pielou (J) para cada amostra florestal inventariada.

Parcela	N	S	F	H'	J
Floresta 1	117	37	20	3,19	0,88
Floresta 2	60	32	24	3,27	0,94
Floresta 3	108	55	31	3,72	0,93
Floresta 4	115	50	26	3,6	0,92
Floresta 5	105	38	26	3,19	0,88
Floresta 6	132	35	21	2,85	0,8
Floresta 7	105	36	23	2,89	0,81
Floresta 8	123	39	22	3,15	0,86
Capoeira 1	40	24	21	2,94	0,92
Capoeira 2	36	11	11	1,79	0,75
Capoeira 3	36	16	14	2,38	0,86
Capoeira 4	71	15	11	1,85	0,68
Geral	1048	136	50	4,1	0,84

Fonte: Garcia 2011.

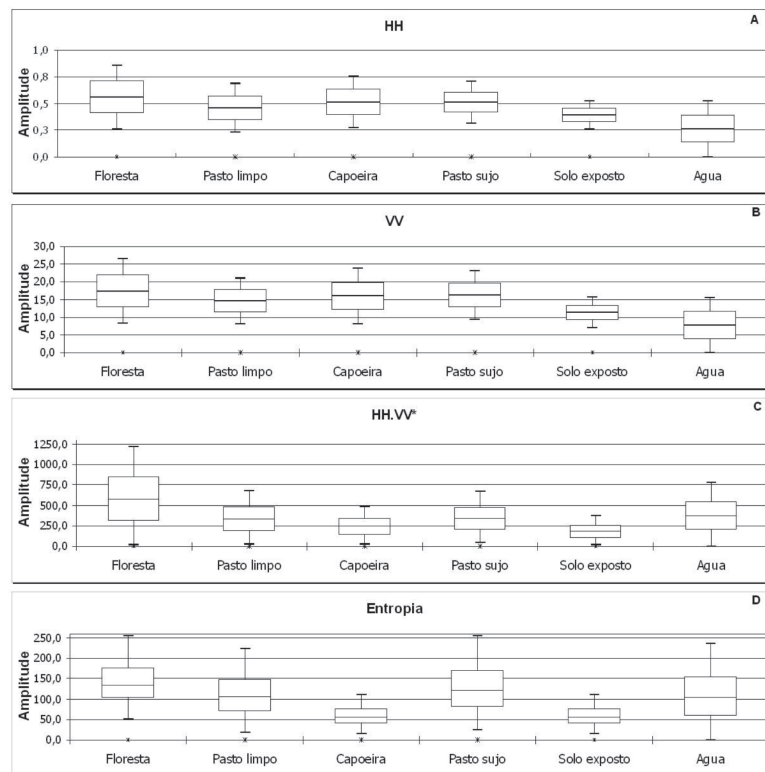


Figura 3 - Gráficos *box-plot* das classes de uso e cobertura da terra nas imagens TerraSAR em modos A_{HH} (a), A_{VV} (b), $A_{<HH,VV*>}$ (c) e Entropia (d).

Classificação Maxver

A classificação pelo método de máxima verossimilhança obteve uma boa concordância, segundo a categorização de Landis e Koch (1977), indicada pelo valor do índice *Kappa* encontrado de 0,53. Na Figura 4 é apresentada a distribuição espacial das classes temáticas para essa região de Sena Madureira (AC), bem como a respectiva matriz de confusão e índice de concordância *Kappa* (Tabela 2), indicando o nível de desempenho desse classificador estatístico pontual.

Particularizando a discriminação entre classes, o melhor desempenho classificatório foi do tema solo exposto com 98%, seguido pelo pasto limpo 81%. A classe floresta apresentou apenas 55% dos pixels classificados corretamente, sendo que as classes capoeira (43%) e pasto sujo (51%) foram as que apresentam maior dificuldade de distinção, inclusive comprovado quando se calcula os valores da distância Jeffries-Matusita (JM = 0,312) entre classes. Esta baixa separabilidade poder ser explicada pela complexidade polarimétrica apresentada pelas classes acima mencionadas, em razão,

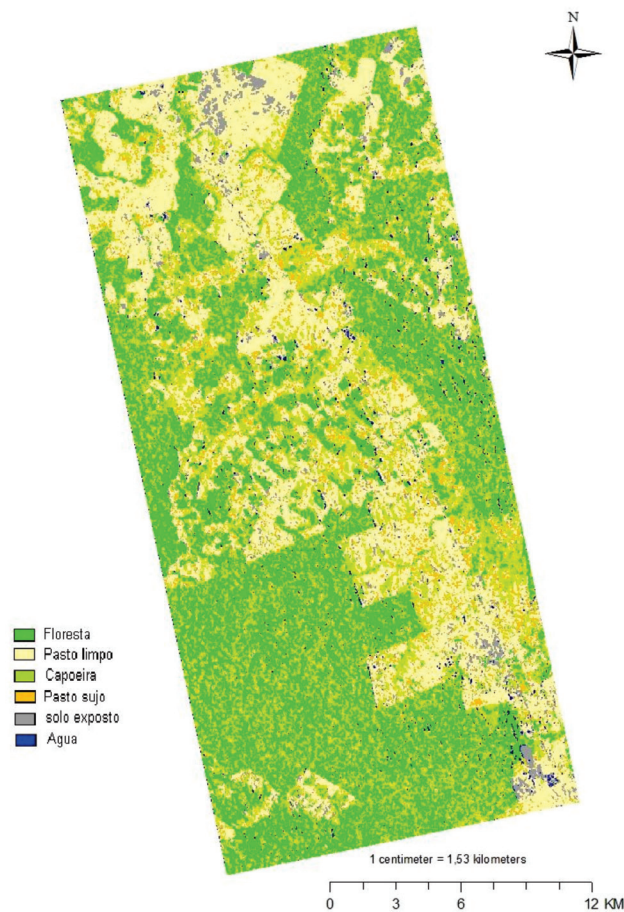


Figura 4 - Classificação temática pelo método MAXVER através do conjunto de imagens (A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH,VV>}$, $A_{entropia}$).

Tabela 2 - Matriz de confusão derivada da classificação MAXVER

	Água	Capoeira	Floresta	Pasto limpo	Pasto sujo	Solo exposto
Água	32,03	0,02	0,33	0,33	0,00	0,00
Capoeira	2,57	43,74	25,10	3,42	17,57	0,00
Floresta	0,00	4,88	55,09	0,00	1,80	0,00
Pasto limpo	6,29	22,92	5,25	80,78	28,00	1,86
Pasto sujo	1,41	27,45	13,85	9,50	50,94	0,00
Solo exposto	57,70	1,00	0,37	5,97	1,69	98,14

Exatidão Global = 63.70% *Kappa* = 0.530 (Var = 5,43E-04)

possivelmente, da ocorrência em áreas de relevo dissecado, com particular influência de sombras ou diferenças de iluminação, dependendo da variável geomorfológica “pendente” na direção do imageamento desse SAR em banda X. Acrescente-se a isso outros dois fatores: o primeiro, decorrente do fato de tratar essa complexidade polarimétrica das classes estabelecidas por um classificador pontual, de reconhecimento gaussiano, o que pode não estar devidamente adaptado às análises SAR para um conjunto de classes de concentrada distribuição de frequências no espaço de atributos-radar que as definem; o segundo, decorrente do fato do sistema TerraSAR operar em banda X, cuja frequência não permite maior penetrabilidade na estrutura dos alvos florestais, aliada ainda a disponibilização de informação dual paralela (HH e VV).

Classificação Context

Ao se utilizar o classificador *Context* com o conjunto das quatro componentes (A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH,VV>}$, $A_{entropia}$), foi alcançado um desempenho categorizado como “muito bom”, decorrente de um elevado valor de *Kappa* (0,704). Na Figura 5 é apresentada a espacialização das classes temáticas e na Tabela 3, a respectiva matriz de confusão e valores de concordância associados.

Neste tipo de abordagem contextual, áreas legendadas como pasto sujo apresentaram um fraco desempenho classificatório perante as outras classes investigadas, com somente 59% dos pixels classificados corretamente; isso em parte se deve a certa similaridade de resposta polarimétrica com a classe capoeira (22%), caracterizada por constituir-se de um estágio de sucessão inicial, confusão essa já observada na análise das amostras através da distância JM, com valor de 0,317. Os pares de amostras com maior separabilidade corresponderam aos binômios temáticos “floresta - solo exposto” (JM = 1,977) e “solo exposto - capoeira” (JM = 1,878).

Ao comparar as classificações MAXVER (*Kappa* = 0,53) e *Context* (*Kappa* = 0,70) e em seguida efetuar uma análise do

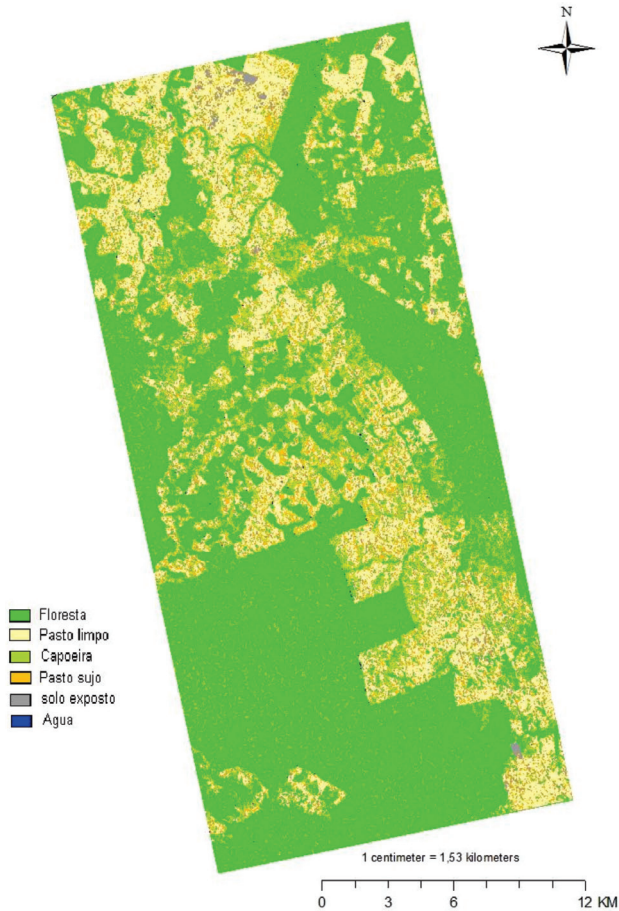


Figura 5 - Classificação temática pelo método *Context* do conjunto de imagens (A_{HH} , A_{VV} , $A_{<HH,VV>}$, $A_{entropia}$).

kappa condicional para cada classe (Tabela 4), e considerando as informações obtidas nas matrizes de confusão que foram consideradas diferentes de acordo com o teste Z, ao nível de significância de 5%, pode-se afirmar que a classificação pelo método *Context* apresentou melhor desempenho para separar as seis diferentes classes ao se fazer uso das quatro componentes em amplitude da imagem TerraSAR-X

Tabela 3 - Matriz de confusão derivada da classificação pelo método *Context*.

	Água	Capoeira	Floresta	Pasto limpo	Pasto sujo	Solo exposto
Água	81,82	0,00	1,15	0,00	0,00	0,00
Capoeira	0,00	100,00	11,49	11,63	22,73	0,00
Floresta	0,00	0,00	81,61	0,00	9,09	0,00
Pasto Limpo	0,00	0,00	1,15	72,09	0,00	0,00
Pasto Sujo	0,00	0,00	3,45	13,95	59,09	0,00
Solo Exposto	18,18	0,00	1,15	2,33	9,09	100,00

Exatidão Global = 78.33% *Kappa* = 0.704 (Var = 3,42E-04)

Tabela 4 - Valores de *Kappa* condicional para cada classe derivado das classificações MAXVER e *Context*.

	Maxver		<i>Context</i>	
	<i>Kappa</i> Condicional	Var (<i>Kappa</i>)	<i>Kappa</i> Condicional	Var (<i>Kappa</i>)
Água	0,6931	3,03E-04	0,983	2,36E-04
Capoeira	0,2461	1,38E-05	0,623	1,79E-03
Floresta	0,9262	5,39E-06	0,880	1,38E-03
Pasto Limpo	0,6247	9,46E-06	0,981	3,03E-04
Pasto Sujo	0,2667	1,32E-05	0,727	3,10E-03
Solo Exposto	0,6523	2,33E-05	0,718	1,76E-03

CONCLUSÕES

Em função dos procedimentos metodológicos adotados no presente trabalho, foi possível chegar às seguintes conclusões:

A classificação contextual apresentou melhor desempenho na classificação dos dados derivados do TerraSAR-X, apresentando um índice *Kappa* de 0.70, com uma exatidão de 78.33% superior àquele do algoritmo classificatório MAXVER.

As polarizações duais HH e VV, de maneira individualizada, mostraram-se limitadas para separar as diversas classes de uso e cobertura da terra pré-estabelecidas, sendo necessária no conjunto de dados tratados, a inclusão de elementos derivados da matriz de covariância, como a componente $\langle HH.VV^* \rangle$ e do parâmetro incoerente “entropia”, derivado da decomposição de alvos.

Na análise exploratória dos dados TerraSAR-X, foi verificado que as classes pasto sujo e capoeira foram as de mais difícil separabilidade. Este fato ficou evidenciado na análise dos gráficos *blox-plot*, nos valores de distância JM entre classes e confirmados nas matrizes de confusão das classificações, independente do algoritmo utilizado, se pontual ou contextual.

Numa perspectiva de prosseguimento da linha investigativa, recomenda-se utilizar dados TerraSAR-X *full* polarimétricos (HH, HV, VH, VV), o que provavelmente permitirá uma maior exploração dos diversos atributos coerentes e incoerentes contidos nas imagens-radar, ampliando inclusive o espectro de abordagens exploratórias (por exemplo, de análise das assinaturas polarimétricas das diversas classes) e de outros algoritmos de classificação. Dados no modo Tanden do TerraSAR-X seriam sobremaneira indicados por incluir as características SAR interferométricas, muito úteis na caracterização estrutural da tipologia florestal em zonas tropicais, de maior complexidade de paisagens.

Em suma, os dados TerraSAR-X investigados possuem certa capacidade de discriminação das classes de uso e cobertura da terra nessa porção da Amazônia brasileira, respeitando-se as limitações pelo modo dual polarimétrico

(HH e VV) do produto disponível aos usuários, além da frequência (banda X) inerente ao sistema radar em seu processo de interação com a superfície do alvo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa do Programa de Estudante-Convênio de Pós-Graduação (PECPG) de pesquisa e de produtividade em pesquisa; ao Dr. Steffen Kuntz, da INFOTERRA, pela cessão de imagens TerraSAR-X e ao Programa Nacional de Cooperação Acadêmica (PROCAD/CAPES) no decorrer da viagem científica à Universidade Federal do Acre (UFAC), dentro do acordo de cooperação INPA/UFRR/UFAC/INPE.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Asner, G.P. 2001. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 3855-3862.
- Cloude, S.R.; Pottier, E., W. 1996. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(2): 498-518.
- Cloude, S.R.; Pottier, E. 1997. An entropy based classification scheme for land application of polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(1): 68-78.
- Cloude, S.R. 2007. The dual polarization entropy/alpha decomposition: a PALSAR case study. p.19. In: POLinSAR Workshop, June 22-26th, 2007. Frascati, Italy. ESA. Abstract Book.
- CPTEC. 2010. Centro de previsão de tempo e estudos climáticos, (http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_brasil.shtml). Acesso em 25/07/2010.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T.; Pierce, L.E.; Sharick, T.L.; Bergen, K.M.; Kellndorfer, J.; Kendra, J.R.; Li, E.; Lin, Y.C.; Nashashbi, A.; Sarabandi, K.; Siqueira, P. 1995. Estimation of forest biophysical characteristics in Northern Michigan with SIRC/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 877-895.
- Eineder, M.; Fritz, T.; Mittermayer, J.; Roth, A.; Börner, E.; Breit, H. 2008. *TerraSAR-X ground segment - Basic product specification document*. In: TerraSAR, Oberpfaffenhofen: DLR - Cluster Applied Remote Sensing, 103 pp.
- Freeman, A.; Durden, S.L. 1998. A three-component scattering model for polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(3): 963-973.
- Freitas, C.C.; Soler, L.S., Sant'anna S. J. S., Dutra, L.V.; Santos, J.R.; Mura, J.C.; Correia, A.H. 2008. Land Use and Land Cover Mapping in the Brazilian Amazon Using Polarimetric Airborne P-Band SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46: 2956-2970.
- Garcia, C.E. 2011. *Análise de imagem polarimétrica TerraSAR-X para classificação de uso e cobertura da terra na porção sudoeste da Amazônia Brasileira*. Tese de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 84 pp.
- Gonçalves, F.G.; Santos, J.R.; Treuhaft, R. N. 2011. Stem volume of tropical forests from polarimetric radar. *International Journal of Remote Sensing*, 32(2): 503- 522.
- Gong, P.; Howarth, P. J. 1992. Frequency-based contextual classification and gray-level vector reduction for land-use identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 58(4): 423-437.
- Guerra, J.B; Mura, J.C; Freitas, C.C. 2010. Discriminação de incrementos de desflorestamento na Amazônia com dados SAR R-99B em banda L. *Acta Amazonica*, 40: 557-566.
- Henderson, F.M.; Lewis, A.J. 1998. *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*, 3rd edition. USA: John Wiley Sons. 896 pp
- Hoekman, D.H.; Quiñones, M.J. 2000. Land cover type and biomass classification using AirSAR data for evaluation of monitoring scenarios in the Colombian Amazon. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2): 685-696.
- Houghton, R.A.; Skole, D.L.; Nobre, C.A.; Hackler, J.L.; Lawrence, K.T.; Chomentowski, W. H. 2000. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, 403: 301-304.
- Kasischke, E.S.; Melack, J.M.; Dobson, C.M. 1997. The use of imaging radars for ecological applications - A review. *Remote Sensing of Environment*, 59 (2): 141- 156.
- Landis, J.R.; Koch, G.G. 1977. The measurements of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33: 159-174.
- Leckie, D.G., Ranson, K.J. 1998. Forestry applications using imaging radar. cap 9, p. 435-509, In: Henderson, F. M.; Lewis, A. J. (Ed.). *Principles and Applications of Imaging Radar*. v.2, ed.3., John Wiley. New York.
- Lee, J. S.; Grunes, M. R.; De Grandi, G. 1999. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(5).
- Lee, J.S.; Grunes, M.R.; Pottier, E. 2001. Quantitative comparison of classification capability: fully polarimetric versus dual and single polarization SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(11): 2343-2351.
- Lim, H.S.; Matjafri, M.Z.; Abdullah, K.; Saleh, N.M. 2008. Analysis of land covers over Northern peninsular Malaysia by using ALOS-PALSAR data based on frequency-based contextual and neural network classification technique. In: ALOS PI 2008 Symposium.11, ALOS PI 2008 Symposium.
- McNairn, H.; Duguay, C.; Brisco, B.; Pultz, T.Z. 2002. The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. *Remote Sensing of Environment*, 80(2): 308-320.
- Narvaes, I. S. 2010. *Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa de biomassa em diferentes fitofisionomias de florestas tropicais*. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo. 164 pp.

- Neeff, T.; Dutra, L.V.; Santos, J.R.; Freitas, C.C.; Araujo, L.S. 2005a. Tropical forest biomass measurement by interferometric height modeling and P-band radar backscatter. *Forest Science*, 51(6): 585-594.
- Neeff, T.; Dutra, L.V.; Santos, J. R.; Freitas, C.C.; Araujo, L.S. 2005b. Power spectrum analysis of SAR data for spatial forest characterization in Amazonia. *International Journal of Remote Sensing*, 26(13): 2851-2865.
- Pitz, W.; Miller, D. 2010. The TerraSAR-X satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(2): 615-622.
- Pope, K. O.; Benayas-Rey, J. M.; Paris, J. F. 1994. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 205-219.
- RADAMBRASIL. 1978. Folhas SC.19 Rio Branco: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Levantamento de Recursos Naturais, Rio de Janeiro, 554 pp.
- Richards, J.A., Jia, X. 1999. *Remote sensing digital image analysis*, 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 439 pp.
- Rignot, E.; Salas, WA.; Skole, D.L. 1997. Mapping deforestation and secondary growth in Rondonia, Brazil, using imaging radar and Thematic Mapper data. *Remote Sensing of Environment*, (59): 167-179.
- Rodrigues, T.G. 2010. *Análise da viabilidade de mapeamento topográfico (escala 1:100.000) na região Amazônica através da integração de informações altimétricas SRTM-3 e planimétrica PALSAR: uma avaliação para a Serra dos Carajás (PA)*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. São Paulo. 163 pp.
- Saatchi, S.S.; Soares, J.V.; Alves, D.S. 1997. Mapping deforestation and land use in Amazon rainforest by using SIR-C Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 59(2): 191-202 pp
- Saatchi, S.S.; Halligan, K.; Despain, D.G.; Crabtree, R.L. 2007. Estimation of forest fuel load from radar remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1726 – 1740.
- Santos, J.R.; La Cruz, M.S.P.; Araújo, L.S. 2002. Savanna and tropical rainforest biomass estimation using JERS-1 data. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 1217-1229.
- Santos, J.R.; Mura, J.C.; Paradella, W.R.; Dutra, L.V.; Gonçalves, F.G. 2008. Mapping recent deforestation in the Brazilian Amazon using simulated L-band MAPSAR images. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 4879-4889
- Santos, J.R.; Narvaes, I.S.; Graça, P.M.L.A.; Gonçalves, F.G. 2009. *Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon*, p. 183-206. In: Gary Jedlovec (NASA/MSFC-USA). (Org.). *Advances on Geoscience and Remote Sensing*. 1a. ed. v. 8. Vukovar, Croatia: IN-TECH.
- Ulaby, F.T.; Moore, R. K.; Fung, A.K. 1981. *Microwave remote sensing: active and passive, vol. I, Microwave remote sensing fundamentals and radiometry*, Addison-Wesley, Advanced Book Program, Reading, Massachusetts. 456 pp.
- Ulaby, F.T.; M.C. Dobson. 1989. *Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain*, Artech House, Massachusetts. 362 pp.
- Ulaby, F.T.; Elachi, C. 1990. *Radar polarimetry for geoscience applications*.: Artech House, London. UK. 364 pp.
- Van Der Sanden, J.J.; Hoekman, D. H. 1999. Potential of airborne radar to support the assessment of land cover in a tropical rain forest environment. *Remote Sensing of Environmen*, 68: 26-40.
- Vieira, I.C.G.; Silva, J.M.C.; Toledo, P.M. Estratégias para evitar a perda biodiversidade na Amazônia. 2005. *Estudos Avançados*, 19(54): 153-164.
- Vieira, P.R. *Desenvolvimento de classificadores de máxima verossimilhança e ICM para imagens SAR, 1996*. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 251 pp.
- Werninghaus, R.; Buckreuss, S. 2010. The TerraSAR-X mission and system design, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(2): 606-614

Recebido em 12/02/2011

Aceito em 18/04/2011