

Caracterização de uso e cobertura da terra na Amazônia utilizando imagens duais multitemporais do COSMO-SkyMed

Adriana Rodrigues de AZEVEDO^{1*}, João Roberto dos SANTOS², Fábio Furlan GAMA², Paulo Maurício Lima de Alencastro GRAÇA³, José Cláudio MURA²

¹ Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. EQSW 103/104, Complexo Administrativo, Sudoeste, CEP: 70.670-350. Brasília, DF, Brasil.

* Autor Correspondente: adriana.azevedo@icmbio.gov.br

² Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Coordenação de Observação da Terra - OBT/INPE. Av. dos Astronautas, 1758, CEP: 12.227-010. São José dos Campos, São Paulo, Brasil. jroberto@dsr.inpe.br, fabio@dpi.inpe.br, mura@dpi.inpe.br.

³ Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Coordenadoria de Dinâmica Ambiental - CDAM/INPA. Av. André Araújo, 2936, CEP: 69060-001. Manaus, Amazonas, Brasil. pmlag@inpa.gov.br.

RESUMO

A utilização de imagens de radar é fonte alternativa de informações para subsidiar o monitoramento da região amazônica, visto que as imagens ópticas têm limitações de imageamento em zonas tropicais face a ocorrência de nuvens. Por conseguinte este trabalho teve como objetivo analisar a capacidade das imagens-radar de banda X multitemporais e polarizadas obtidas pelo satélite COSMO-SkyMed (CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), no modo intensidade, isoladamente e agregados às informações texturais, na caracterização temática de uso e cobertura da terra no município de Humaitá/AM. A metodologia empregada consistiu da: análise das imagens duais obtidas em duas aquisições subsequentes, de forma a explorar a potencialidade do conjunto de dados na forma *quad-pol* intensidade; extração dos atributos texturais a partir da matriz de coocorrência (*Gray Level Co-occurrence Matrix*) e posterior classificação contextual; avaliação estatística de desempenho temático das imagens intensidade e texturais, isoladas e em grupos polarizados. Dentre os vários resultados alcançados, foi verificado que o grupo formado somente pelas imagens intensidade apresentou o melhor desempenho, comparado àqueles contendo os atributos texturais. Nesta separabilidade, estavam envolvidas as classes de floresta, floresta aluvial, reflorestamento, savana, pasto e queimada, obtendo-se 66% de acurácia total e valor Kappa de 0,55. Os resultados mostraram que as imagens de banda X do COSMO-SkyMed, modo StripMap (Ping-Pong), multipolarizadas, têm potencial moderado para a caracterização e monitoramento da dinâmica de uso e cobertura da terra na Amazônia brasileira.

PALAVRAS-CHAVE: radar, mapeamento florestal, análise textural, monitoramento.

Land use/land cover characterization in Amazonia using COSMO-SkyMed multitemporal images

ABSTRACT

The use of radar imagery is an alternative source of information to support the monitoring of the Amazon region, since the optical images have imaging limitations in tropical areas due to the occurrence of clouds. Therefore, the goal of this study is to analyze the radar images in X-band multi-temporal polarized obtained by COSMO-SkyMed satellite (CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), in the intensity mode, isolated and/or combined with textural information, to thematic characterization of land use/land cover in the Humaitá, Amazonas State region. The methodology used includes: analysis of the dual images obtained during two subsequent acquisitions, in order to explore the potential of the dataset as a *quad-pol* intensity; extraction of textural attributes from the co-occurrence matrix (*Gray Level Co-occurrence Matrix*) and subsequent contextual classification; statistical assessment of the thematic performance of the intensity and textural images, isolated and in polarized groups. Within the results achieved, the group formed only by the intensity images presented a better performance if compared to those containing the textural attributes. In this discrimination, the classes involved were forest, alluvial forest, reforestation, savannah, pasture and burned areas, yielding 66% overall accuracy and a Kappa value of 0.55. The results showed that X band images, from COSMO-SkyMed, StripMap mode (Ping-Pong), multi-polarized, presents a moderate potential to characterize and monitor the dynamics of land use/land land cover in the Brazilian Amazon.

KEYWORDS: radar, forest mapping, textural analysis, monitoring.

INTRODUÇÃO

O monitoramento da expansão da atividade agrícola e pecuária na região Amazônica tem sido realizado extensamente por meio de sensores remotos ópticos, auxiliando no controle e fiscalização do desmatamento (Graça *et al.* 2007). Porém, o uso de tais ferramentas é prejudicado pelas condições de intensa cobertura de nuvem, comuns nessa região tropical (Asner 2001). Dessa forma, o emprego das imagens de radar de abertura sintética (SAR) tem se mostrando uma ferramenta útil para o mapeamento, subsidiando nas tarefas de controle e fiscalização de processos antrópicos na paisagem florestal, por permitir a aquisição de dados independente da iluminação solar e das condições climáticas, além de fornecer informações sobre textura, propriedades dielétricas e conteúdo de umidade presente no alvo (Balzter 2001).

Os sistemas SAR vêm sendo utilizados em florestas tropicais para mapeamento de estrutura florestal e de uso e cobertura do solo (Hoekman e Quiñones 2000; Gonçalves *et al.* 2011; Le Toan *et al.* 2011; Saatchi *et al.* 2011). Para identificação das diferentes fitofisionomias em regiões tropicais, estudos mostram que as bandas P e L, nas polarizações cruzadas (HV onde o sinal-radar é transmitido na polarização Horizontal e recebido na Vertical; e VH sendo transmitido na polarização Vertical e recebido na Horizontal), têm apresentado significativo potencial (Kasischke *et al.* 1997; Yanasse *et al.* 1997; Santos *et al.* 2003). Por sua vez, Garcia *et al.* (2012) mostraram que a utilização das imagens TerraSAR-X (banda X), através da combinação de imagens amplitude das componentes HH (radiação transmitida e recebida na polarização Horizontal) e VV (radiação transmitida e recebida na polarização Vertical), da informação de fase (HH.VV*) e de entropia, formando o conjunto ($A_{HH}, A_{VV}, A_{<HH,VV>}, A_{entropia}$), possui uma boa capacidade para caracterização e delineamento de classes de uso e cobertura na porção sudoeste da Amazônia.

Mais recentemente, com a disponibilidade das imagens COSMO-SkyMed (CONstellation of small Satellites for Mediterranean basin Observation), de banda X, algumas aplicações são relatadas: mapeamento de áreas agrícolas (Paloscia *et al.* 2012), de uso e cobertura da terra (Azevedo *et al.* 2012; Gomes *et al.* 2012) e estudos florestais (Weydahl e Eldhuset 2012). Há, contudo, um espaço importante de pesquisa no uso dessas imagens do COSMO-SkyMed, face à escassez de trabalhos em áreas tropicais.

Segundo Ulaby *et al.* (1986), Kurvonen e Hallikainen (1999) e Sarker *et al.* (2012), a agregação de informações texturais às imagens SAR aumenta o potencial de discriminação das classes de uso e cobertura da terra. Nesse contexto, Kurvonen e Hallikainen (1999) analisaram os efeitos da combinação das imagens intensidade dos sensores ERS-1 (banda C) e JERS-1 (banda L) com os atributos de textura GLCM (*Gray Level Co-occurrence Matrix*), obtidos a partir das

mesmas imagens, para a discriminação de classes de cobertura do solo e tipos florestais.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo a análise da capacidade dos dados multitemporais do sensor COSMO-SkyMed, nas polarizações HH-HV e VV-VH, no formato intensidade, e a avaliação da integração das informações texturais às imagens SAR, na identificação temática de uso e cobertura da terra no sul do estado do Amazonas (AM).

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no município de Humaitá, sul do Estado do Amazonas, entre as coordenadas de 7° 23' - 7° 41' S e 63° 03' e 63° 24' W, perfazendo uma área de aproximadamente 1.007 km² (Figura 1).

Está situada na sub-região do Rio Madeira, sobre a Planície Amazônica (Martins *et al.* 2006), sendo composta pelas unidades pedológicas de argissolo, latossolo, cambissolo, gleissolo e plintossolo (IBGE, 2010a). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am (tropical úmido), caracterizado por temperatura média anual de 25°C e uma estação seca de pequena duração, entre os meses de junho e agosto. Os elevados índices de precipitação na estação chuvosa compensam a estiagem, com valores entre 2050 a 2650 mm por ano, com elevada umidade do ar, variando entre 85 e 90% (INMET, 2009).

A cobertura vegetal da área é formada por Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas, com manchas de Savana (Cerrado) (IBGE 2010b). O domínio Savana, também chamado de Cerrado, aparece na região de estudo na forma de contato (encraves), ocorrendo em meio à floresta, destacando duas formações: Savana Arborizada e Savana Gramíneo-Lenhosa, em acordo com a nomenclatura estabelecida por Veloso *et al.* (1991) e seguida no presente trabalho. A principal atividade econômica desenvolvida na região é a agropecuária apresentando, segundo Becker (2005), expansão de suas fronteiras no sul do Estado. Particularmente no município de Humaitá ocorrem, também, cultivos de grãos tais como arroz, milho, feijão e soja (Pinheiro e Rezende 2012).

Materiais utilizados

As imagens COSMO-SkyMed utilizadas neste trabalho foram adquiridas no modo StripMap, submodo Ping Pong, em passagens de dias consecutivos. A primeira imagem foi obtida pelo sensor em 01/09/2011, nas polarizações HH e HV, e a segunda em 02/09/2011, nas polarizações VV e VH. Os dados originais foram disponibilizados em formato *Single Look Complex* (SLC), cujas características estão contidas na Tabela 1.

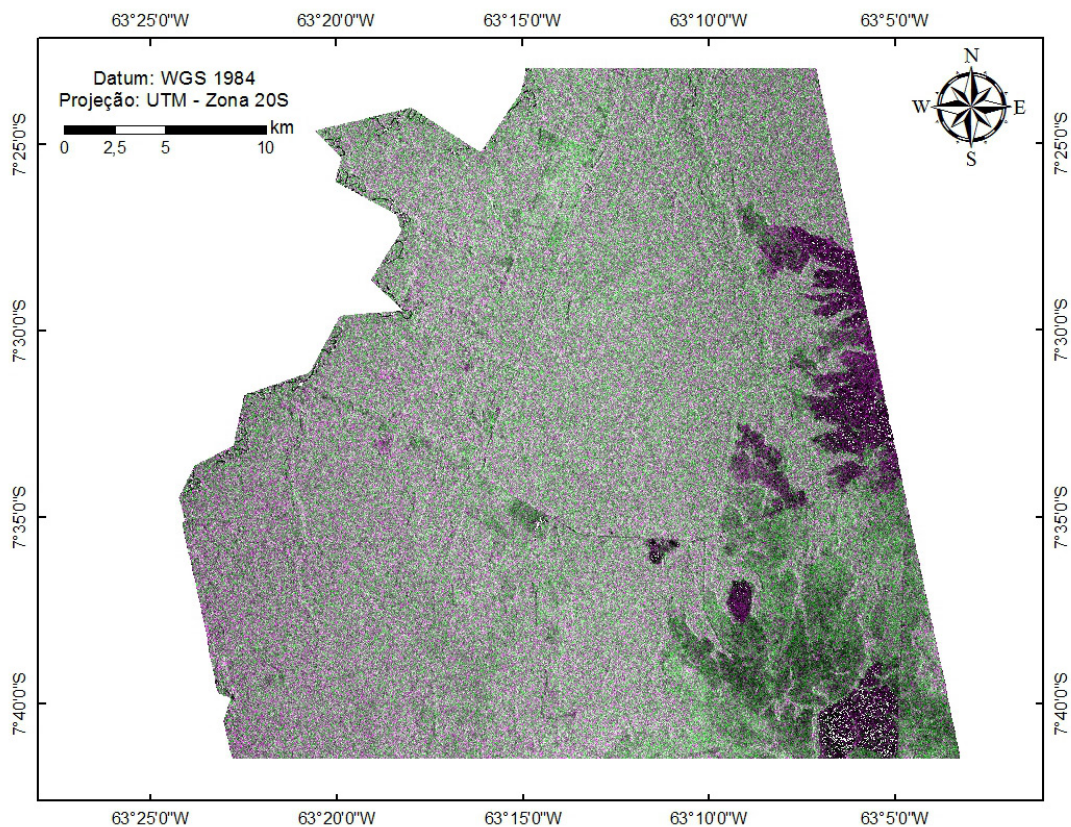


Figura 1 - Localização da área de estudo em composição colorida das imagens COSMO-SkyMed, sendo HH (em vermelho)-HV (verde)-HH (azul).

Como dados auxiliares foram utilizadas informações de campo, coletados em setembro de 2011, em período simultâneo ao imageamento do COSMO-SkyMed. Foram selecionados nesse trabalho de campo 210 pontos amostrais, representativos da paisagem, devidamente descritos, georreferenciados e fotografados, que subsidiaram a identificação temática de uso e cobertura da terra nas imagens obtidas pelo COSMO-SkyMed. Adicionalmente foram utilizadas imagens ópticas (Thematic Mapper/Landsat-5: 05/07/2011 e 06/08/2011, e Linear Imaging Self-Scanner- LISS III/Indian Remote Sensing Satellite-IRS: 20/08/2011 e 13/09/2011), além da informação sobre a presença de focos de calor na região de Humaitá, no período de 01/07/2011 a 02/09/2011, oriundos do projeto PROARCO/INPE (<http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/>), como subsídio à análise interpretativa das condições do uso e cobertura da terra no período investigado. Os dados de focos de calor foram utilizados como informação complementar para a averiguação de ocorrência de áreas de queimadas nas imagens multitemporais COSMO-SkyMed (coletadas em 01 e 02/09/2011).

Neste trabalho, foram consideradas seis classes temáticas: Floresta, abrangendo as áreas de Floresta Ombrófila Aberta e

de Sucessão Secundária em estágios intermediários e avançado de regeneração; Floresta Aluvial, que ocorre ao longo dos cursos d'água ocupando terraços antigos das planícies quaternárias; Savana, incluindo os subgrupos Gramíneo-Lenhosa e Arborizada, bem como aquelas em condições antropizadas, decorrentes muitas vezes da remoção dos componentes florísticos naturais e substituição por práticas agrícolas (principalmente consorciadas ao cultivo de arroz e milho) e/ou de pecuária em determinado período sazonal; Reforestamento, representado por área com plantação de Teca (*Tectona grandis*); Pasto, compreendendo áreas de Pasto Sujo (que corresponde às pastagens sem adequadas condições de manejo ou recém abandonadas, com presença de babaçu (*Attalea speciosa Mart. ex Spreng*) em diferentes densidades de ocorrência ou mesmo espécies pioneiras típicas de elevada capacidade de disseminação no processo regenerativo natural e de Pasto Limpo, onde há o predomínio de vegetação graminóide adequada ao pastoreio, em geral formada por *Brachiaria sp*; Queimada, formada por ação recente do fogo sobre a tipologia vegetal, localizada principalmente em áreas de Savana.

Tabela 1 - Características das imagens COSMO-SkyMed no modo StripMap/Ping Pong.

	Imagem 1	Imagem 2
Passagem	Ascendente	Ascendente
Data	01/09/2011	02/09/2011
Dimensão (km)	30x40km	30x40km
Resolução (m)	15x15	15x15
Polarizações	HH e HV	VV e VH
Ângulo de Incidência	27,5°	27,5°

Com o intuito de utilizar as imagens duais multitemporais como dados *quad-pol*, foram também analisadas as informações de precipitação acumulada, provenientes do Sistema Nacional de Dados Ambientais (SINDA/INPE - <http://sinda.crn2.inpe.br/PCD>), nos períodos que precederam ao imageamento, sobretudo nos dias 01 e 02 de setembro, correspondentes à aquisição das imagens no modo dual COSMO-SkyMed, visando avaliar o teor de umidade nos alvos.

Processamento SAR

No presente trabalho o processamento das imagens SAR incluiu quatro fases: pré-processamento, análise exploratória, classificação e validação, conforme demonstrado de forma sumarizada na Figura 2. A fase de pré-processamento constou de: (1) extração do Modelo Digital de Elevação (MDE); (2) processamento *multilook*; (3) correção de pixels com valores nulos, presentes nas polarizações cruzadas HV e VH; (4) correção das imagens; (5) aplicação do filtro; (6) geocodificação; (7) análise das polarizações cruzadas; (8) extração dos atributos texturais; (9) padronização das imagens intensidade e texturais.

A partir das imagens no formato *Single Look Complex* (SLC), foi obtido o Modelo Digital de Elevação (MDE), a ser aplicado na etapa de geocodificação. Para tanto, utilizou-se como base o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), obtido no endereço eletrônico do *Consortium for Spatial Information* - CGIAR-CSI (<http://srtm.csi.cgiar.org/>), utilizando o *software* SARscape. As imagens SLCs, foram processadas no modo *multilook*, adotando dois *looks* na direção de *range* e 11 *looks* na direção de azimute, com vistas a reduzir o ruído *speckle*, além de ajustar as dimensões das imagens. Dessa forma foram geradas imagens em *slant range* no formato intensidade para as polarizações HH, HV, VV e VH.

Analisando estas imagens, identificou-se a presença de pixels sem valores definidos (*dummy* pixels) nas imagens de polarização cruzada (HV e VH), que por sua vez foram substituídos pelo valor interpolado dos pixels vizinhos durante a etapa de geocodificação empregando o programa SARscape. O processamento posterior consistiu da aplicação do filtro Lee nas imagens multipolarizadas, com janela de tamanho 10x10 pixels. Apesar do processamento *multilook* ter sido aplicado previamente para a minimização do *speckle*, julgou-se necessário realizar uma redução mais aprofundada do ruído por meio da utilização do filtro. Ao final, as imagens foram geocodificadas a partir do MDE extraído anteriormente.

Com o intuito de se utilizar as imagens duais como dados *quad-pol*, foi realizada a análise das polarizações cruzadas HV e VH, considerando o princípio da reciprocidade, ou seja, que as intensidades dos sinais retroespalhados em HV e VH sejam iguais. Estas análises foram realizadas sobre o perfil do comportamento radiométrico dos sinais e dos valores de média e desvio padrão de polígonos das classes Floresta e Savana Gramíneo-Lenhosa nas imagens HV e VH, avaliando

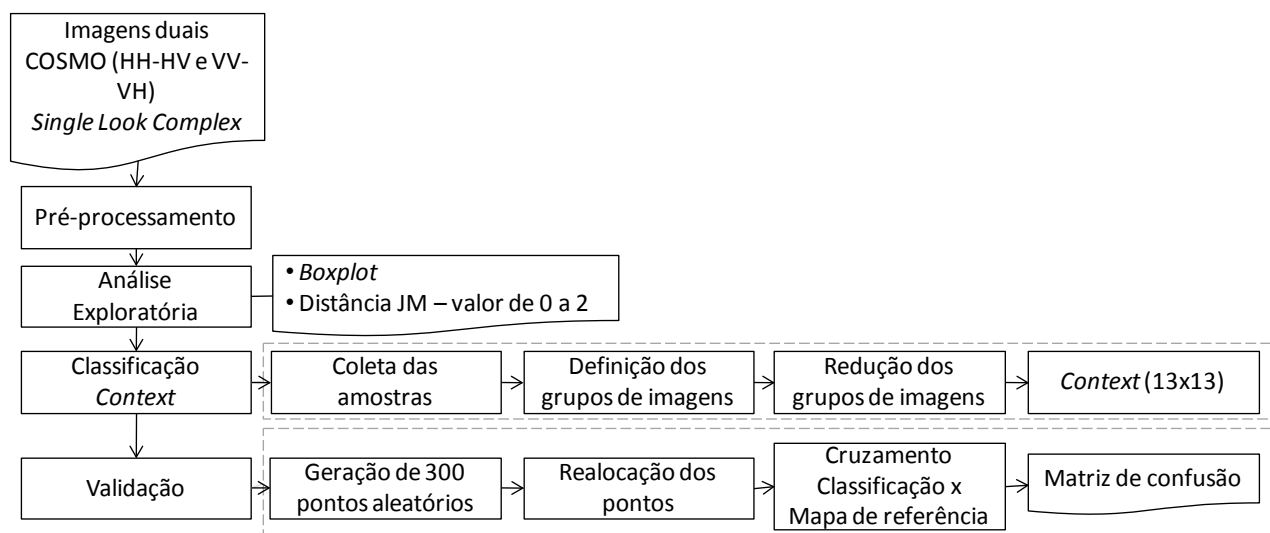


Figura 2 - Abordagem metodológica do processamento realizado nas imagens COSMO-SkyMed.

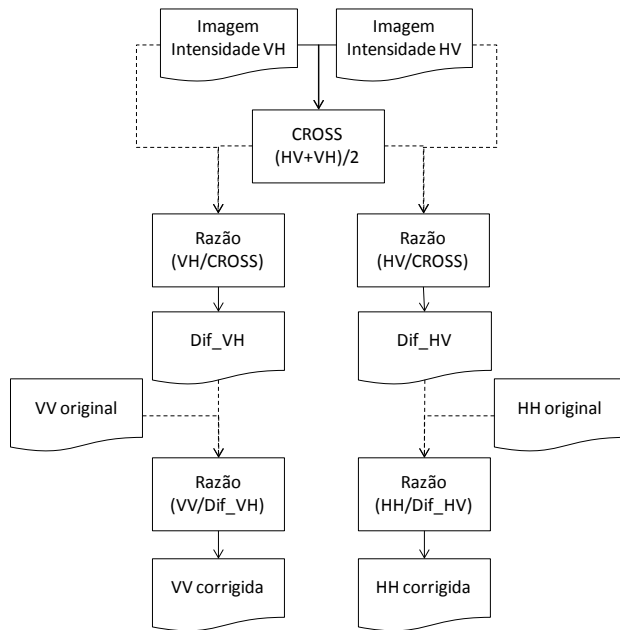


Figura 3 - Fluxograma da metodologia adotada para a correção das imagens adquiridas em datas diferentes.

a significância das diferenças encontradas, por meio do teste de hipótese de diferença de médias populacionais. Foram escolhidos dois polígonos representativos de cada classe, sendo considerado para a análise o valor médio entre eles. A utilização de apenas duas classes foi considerada suficiente uma vez que se trata de uma análise exploratória do sinal.

Tendo em vista a possibilidade de utilização do produto originário do imageamento multitemporal como dado *quad-pol*, o procedimento metodológico a ser aplicado nessas imagens, para correção de diferenças na amplitude do sinal decorrente do multi-imageamento pode ser visto na Figura 3.

Inicialmente foi realizada a média entre as imagens das polarizações HV e VH, obtendo-se dessa forma a imagem denominada “CROSS”. Em seguida é produzida a imagem-diferença denominada “Dif_VH”, resultante da razão entre as imagens VH e CROSS. Operação idêntica foi realizada para a imagem HV, obtendo-se então a imagem “Dif_HV”. A partir desses produtos, realizam-se as correções das imagens co-polarizadas VV e HH por meio das razões VV/Dif_VH e HH/Dif_HV, resultando nas imagens HH_cor e VV_cor. Dessa forma, as imagens corrigidas, são referenciadas ao longo deste artigo como HH, VV e CROSS (média entre HV e VH).

Os atributos texturais foram extraídos a partir das imagens HH, VV e CROSS, isoladamente, adotando os parâmetros de textura GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) (Haralick *et al.* 1973), utilizando janela com tamanho de 1x11 pixels. Dentre as texturas GLCM, foram consideradas: homogeneidade, contraste, dissimilaridade, média, desvio

padrão, entropia e correlação. Dessa forma, foram obtidas sete imagens texturais a partir da imagem HH, sete de VV e sete de CROSS, totalizando 21 atributos texturais GLCM.

As imagens de textura apresentam distintas faixas de valores entre si e em relação às imagens intensidade. Com o intuito de evitar supervalorizar os atributos que apresentam valores maiores, durante o processo de classificação, optou-se por padronizar todos os atributos, passando então a apresentarem valores entre zero e um, conforme metodologia aplicada por Soares *et al.* (1997). Para o cálculo dos valores máximos e mínimos foram considerados três desvios padrões para as imagens intensidade e dois desvios padrões para os atributos de textura.

Para a definição dos grupos de imagens de textura, foi realizada uma análise exploratória, utilizando *boxplot* e distância Jeffries-Matusita (JM) de cada atributo textural, com o objetivo de avaliar suas capacidades de separabilidade para as classes temáticas. Para a elaboração dos *boxplot*, foram utilizados os valores médios de intensidade de cada polígono amostrado para cada tema.

A classificação *Context*, desenvolvida por Gong e Howarth (1992) e implementada no *software* PCI Geomatics, baseia-se na frequência de ocorrência dos níveis de cinza dentro de uma determinada janela de pixels. Essa metodologia requer uma fase de treinamento, que consiste na coleta de amostras para subsidiar a classificação. Nesta fase foram coletados 105 polígonos de Floresta (171.475 pixels), 23 de Floresta Aluvial (2.085 pixels), 26 de Savana (9.776 pixels), um de Reflorestamento (1.032 pixels), 19 de Pasto (10.002 pixels) e 26 de Queimada (20.644 pixels). A classe Reflorestamento ocorre somente em uma pequena região na área de estudo sendo, portanto, possível apenas a coleta de um polígono de amostragem.

Inicialmente, essa classificação necessita da redução dos grupos de imagens, gerando uma imagem de saída cujos níveis de cinza variam de 0 a 50. Para tanto, foram definidos os grupos de imagens, que incluem as imagens intensidade e texturais. Em seguida, esses grupos foram reduzidos, gerando as imagens que subsidiaram as classificações. Para a definição do tamanho de janela a ser utilizada na classificação, foi realizada uma avaliação utilizando janelas com dimensões ímpares de 5x5 até 21x21 pixels. O melhor resultado foi alcançado pela janela de tamanho 13x13 pixels.

Como subsídio ao processo de validação das classificações, foi elaborado um mapa referência a partir da imagem Landsat 5/TM, órbita/ponto 232/65, de 06 de agosto de 2011, acrescida das informações de campo, dos focos de calor entre 01 de julho e 01 de setembro de 2011, além das imagens Landsat 5/TM de 05 de julho de 2011, IRS/LISS3, órbita/ponto 312/81, de 20 de agosto e 13 de setembro de

Tabela 2 - Valores de média (μ) e desvio padrão (σ) das classes Floresta e Savana Gramíneo-Lenhosa, nas polarizações VH e HV.

Classe	Nº pixels	VH		HV		μ VH - μ HV Valor Z
		μ	σ	μ	σ	
Floresta	12.460	721,20	252,52	495,49	168,95	
	24.444	803,09	266,24	569,10	182,26	
Média	36.904	762,14	259,38	532,29	175,60	140,90
Savana Gramíneo-Lenhosa	315	628,28	225,73	413,34	142,96	
	243	605,48	216,09	404,71	124,35	
Média	4.471	616,88	220,91	409,02	133,65	19,00

2011 além da própria imagem COSMO-SkyMed de 01 de setembro de 2011.

A fase de validação foi realizada no *software* ArcGis 9, com as imagens classificadas sendo exportadas do ambiente PCI para o ArcGis. Foram criados 300 pontos amostrais aleatoriamente e posteriormente realizou-se a análise da localização dos pontos e realocação dos mesmos, com base no mapa referência e com apoio do conhecimento de campo, com o intuito de que todas as classes fossem contempladas com o maior número de pontos possível. Posteriormente foi realizado o cruzamento entre os pontos de validação e as imagens classificadas, permitindo, dessa forma, a elaboração das matrizes de confusão e o cálculo do índice *Kappa* estimado.

RESULTADOS

A partir dos resultados da análise das polarizações cruzadas, verificou-se que os valores de média e desvio padrão do sinal retroespalhado na polarização VH das amostras de Floresta e Savana Gramíneo-Lenhosa são estatisticamente maiores em relação aos de HV (Tabela 2). Porém, ao comparar a variação dos valores de média e desvio padrão entre as classes, nota-se o mesmo comportamento do sinal retroespalhado em ambas as polarizações. Assim, pode ser verificado que o valor da média da classe Floresta é maior do que o de Savana Gramíneo-Lenhosa, tanto na polarização VH como em HV. Essa relação no comportamento radiométrico do sinal entre as polarizações também pode ser verificado através do perfil radiométrico da linha 1.671 traçado nas imagens HV e VH (Figura 4).

Por sua vez, considerando os resultados obtidos na análise exploratória dos atributos texturais, foi possível definir oito grupos de imagens, sobre os quais foram realizadas classificações expeditas, para avaliar aquele de melhor desempenho temático. O grupo de imagens texturais formado pelos atributos Homogeneidade e Média de HH; Contraste, Dissimilaridade, Média e Desvio Padrão de CROSS; e Dissimilaridade, Média e Desvio Padrão de VV, apresentou valor médio de distância JM de 1,68 e alcançou o melhor resultado na classificação (acurácia total = 64,33% e *Kappa* = 0,553), comparado aos demais possíveis grupos de formação. Portanto, esse grupo textural foi utilizado nas classificações, juntamente com as imagens intensidade.

Para a etapa metodológica de validação de todas as classificações possíveis, foi utilizado o mapa referência (Figura 5). As classificações contextuais foram realizadas utilizando sete grupos de imagens, que incluíram as imagens intensidade nas três polarizações e o grupo de textura mencionado anteriormente, de forma isolada e agrupada, considerando as seis classes temáticas de interesse. A partir das validações das classificações foram obtidos os valores de acurácia total e índice *Kappa* (Tabela 3).

Observa-se que o grupo HH+CROSS+VV apresentou melhor desempenho temático, com 66% de acurácia total e valor *Kappa* de 0,554 (concordância moderada), quando comparado aos demais grupos, inclusive aqueles nos quais estão inseridas as medidas texturais. Não obstante, estatisticamente os resultados obtidos nas demais classificações não apresentam diferença significativa, ao nível de 5% de significância, quando comparado ao melhor resultado. A matriz de confusão originada da classificação HH+CROSS+VV pode ser visualizada na Tabela 4, enquanto que o resultado dessa classificação é mostrado na Figura 6.

DISCUSSÃO

Considerando os resultados obtidos pela análise do comportamento radiométrico das imagens HV e VH, e a inexistência de variações significativas no índice pluviométrico para a região entre as datas dos dois imageamentos, podemos aceitar como premissa que a diferença na intensidade do sinal é consequência exclusivamente de uma possível diferença nas potências de emissão ou mesmo variação no ganho das antenas dos radares utilizados nas duas passagens. Decorrente do conhecimento obtido em campo, pode-se afirmar que o comportamento radiométrico dos sinais indica não haver alterações na condição fisionômico-estrutural e na capacidade fotossintética da vegetação presente na paisagem, entre as duas datas das imagens investigadas. Essas análises indicaram a possibilidade de utilizar as imagens duais de forma conjunta, ou seja, como um dado *quad-pol*. Para tanto, foi realizada a correção das imagens, conforme indicado na Figura 3, de modo a retirar as diferenças de efeitos radiométricos supracitadas, consideradas estatisticamente significativas, entre as imagens adquiridas em datas diferentes.

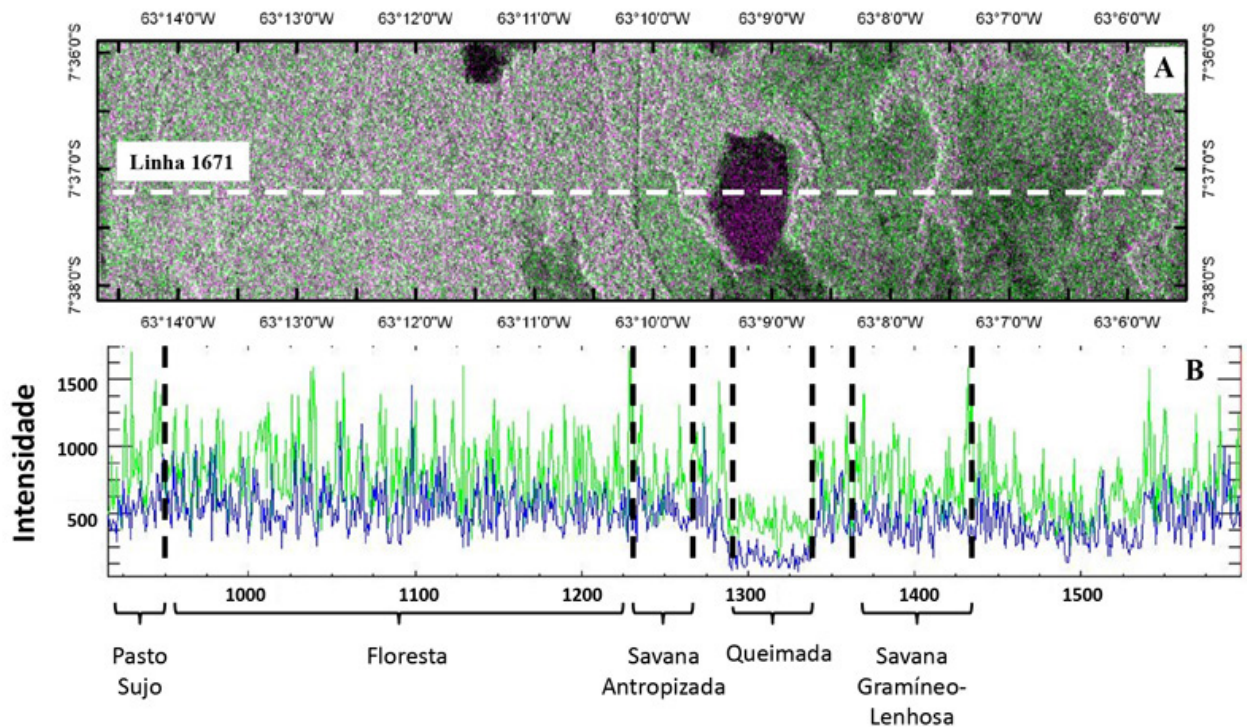


Figura 4 - Perfil da linha 1671 (demarcação tracejada) nas imagens de polarizações HV e VH do COSMO-SkyMed (A), e o respectivo comportamento radiométrico dos sinais para as classes temáticas presentes na cena, sendo o sinal de VH representado pela linha verde e o sinal HV pela linha azul (B).

A partir da análise de matriz de confusão da melhor classificação obtida (HH+CROSS+VV) é possível notar a existência de similaridade no espaço de atributos radiométricos das imagens COSMO-SkyMed, entre as classes Reflorestamento e Floresta, decorrente dos mecanismos de espalhamento superficial e, talvez, volumétrico na banda X perante a estrutura de dossel dessas tipologias citadas. A Floresta Aluvial também apresentou algumas áreas classificadas como Floresta, indicando haver certa similaridade na configuração do espaço de atributos radiométricos na imagem COSMO-SkyMed.

Ainda decorrente dessa matriz de confusão, observa-se também que a classe Queimada apresentou certa similaridade radiométrica com Savana, fato causado devido às regiões de

queimadas serem constituídas, em sua maior parte, por áreas de Savana Arborizada. Em geral, a queima ocorre no estrato herbáceo, atingindo alguns indivíduos arbustivo-arbóreos, cuja estrutura fisionômica permanece. A banda X, por apresentar maior interação com o topo da cobertura vegetal, sem alcance de penetração no alvo, detecta a sua estrutura que mesmo após a queima pode permanecer conservada, gerando assim uma confusão espectral entre essas classes.

Outro caso que apresenta alguma similaridade de configurações radiométricas é o de áreas de pastagem. Essas são compostas geralmente por um tapete graminóide, com indivíduos arbustivos esparsos, decorrente do processo regenerativo natural. Mas foi constatada uma elevada densidade de palmeiras (em especial babaçu) em diferentes

Tabela 3 - Valores de acurácia, *Kappa* e variância do *Kappa* das classificações.

Grupos	Acurácia (%)	Kappa	Variância do Kappa
HH + CROSS	64,67	0,553	0,001190417
VV + CROSS	61,67	0,519	0,001174297
HH + CROSS + VV	65,67	0,554	0,001240121
Textura	64,33	0,553	0,001122994
HH + CROSS + VV + Textura	64,67	0,559	0,001156269
HH + CROSS + Textura	59,67	0,498	0,001247117
VV + CROSS + Textura	62,00	0,522	0,001186992

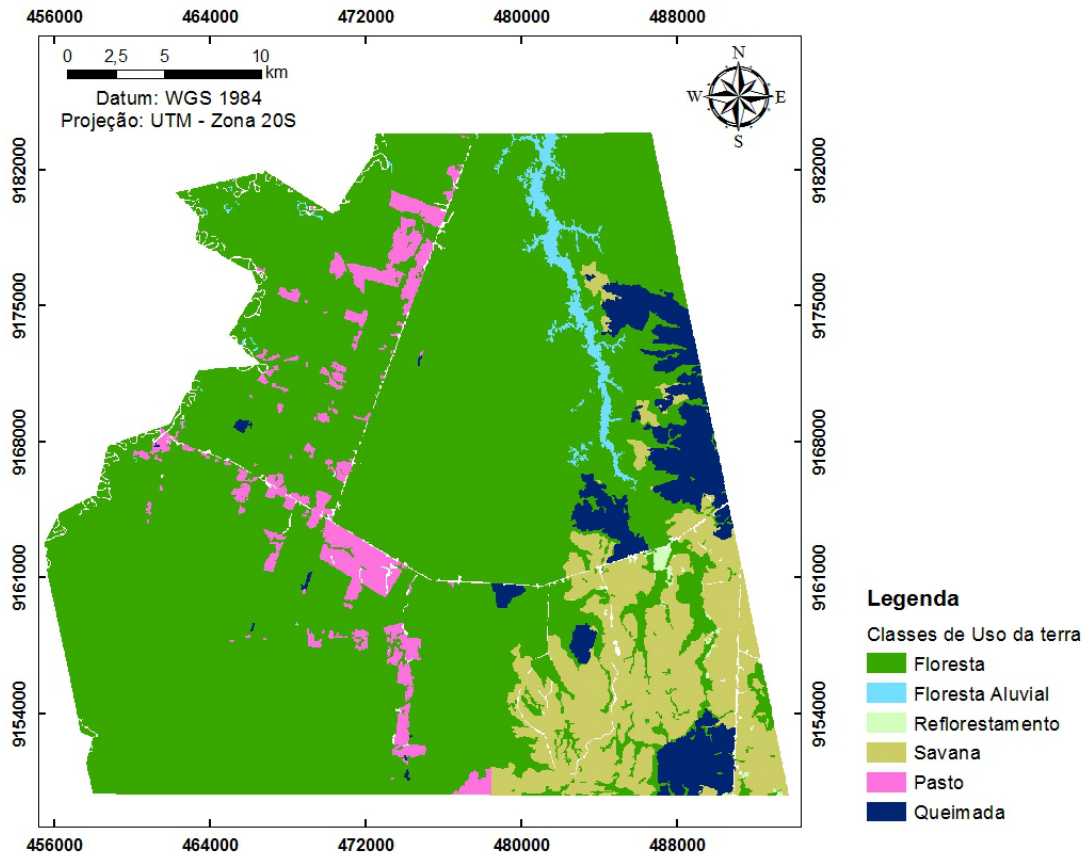


Figura 5 - Mapa referencial da área de estudo utilizada na etapa de validação.

graus de crescimento vegetativo, razão da ausência de práticas de manejo adequadas às condições de pastoreio. Assim, a variação estrutural dessas áreas de pastagem passa a ocupar um espaço de atributos radiométricos similar, na banda X, àquele da classe Savana Gramíneo-Lenhosa, e até mesmo como alvos de estrutura florestal. Stolz e Mauser (1995) também apontaram dificuldade em discriminar as classes Pasto e Floresta ao realizar a classificação de imagens amplitude multitemporais do sensor em banda X, na polarização VV.

Segundo os autores, essa diferenciação é possível com a utilização da banda L, que apresenta maior penetrabilidade. Acrescente-se ainda que, além das atividades de pastoreio serem realizadas em áreas onde a floresta foi derrubada e convertida em pasto, é comum nessa região a atividade de pecuária extensiva desenvolvida no próprio domínio savânico, o que torna também difícil uma discriminação específica com os dados sensorizados em banda X, entre o tema Savana e Pasto.

Tabela 4 - Matriz de confusão da classificação realizada com o grupo de imagens intensidade HH+CROSS+VV.

		MAPA REFERÊNCIA (%)					
Classes		Floresta	Fl. Aluvial	Reforest	Savana	Pasto	Queimada
CLASSIFICAÇÃO (%)	Floresta	82,8	22,7	77,8	2,8	35,6	2,5
	Fl. Aluvial	7,1	72,7	0,0	11,3	15,3	0,0
	Reforest	3,0	0,0	22,2	0,0	5,1	0,0
	Savana	3,0	0,0	0,0	70,4	16,9	20,0
	Pasto	3,0	4,5	0,0	7,0	27,1	0,0
	Queimada	1,0	0,0	0,0	8,5	0,0	77,5
ACURÁCIA TOTAL = 65,67%		KAPPA = 0,554					

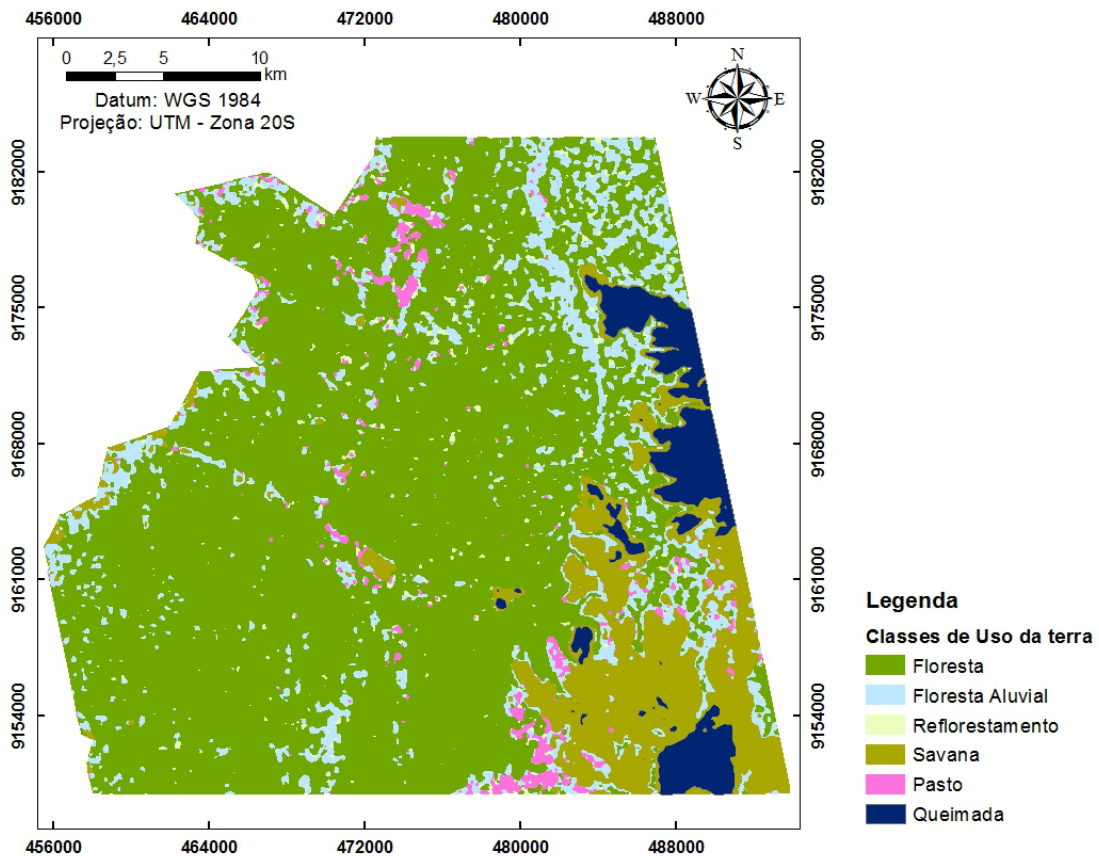


Figura 6 - Mapa da classificação Context utilizando o grupo de imagens intensidade HH+CROSS+VV.

O resultado deste trabalho diverge do exposto em estudos realizados por Van Der Sanden e Hoekman (1999) e Kurvonen e Hallikainen (1999), que sugerem a utilização dos atributos texturais com o intuito de melhorar significativamente a classificação de cobertura e uso da terra. É importante registrar que tais pesquisas citadas foram desenvolvidas com o emprego de classificador estatístico pontual, como o MAXVER, cujos algoritmos não são adaptados ao tipo de distribuição estatística e da presença de *speckle* que os dados SAR apresentam. Assim, ao utilizar um classificador contextual, mais adaptado às características radiométricas dos dados SAR, as classificações utilizando somente imagens intensidade indicam resultados superiores em termos absolutos de desempenho temáticos, mas estatisticamente similares àqueles obtidos com a agregação de informação textural.

CONCLUSÕES

A avaliação das imagens duais HH-HV e VV-VH, oriundas de imageamento multitemporal, do satélite COSMO-SkyMed, no sub-modo Ping Pong, mostra através do comportamento radiométrico destas polarizações a possibilidade de uso como imagens *quad-pol* intensidade. Isto fica confirmado pelo melhor desempenho temático obtido

pela classificação realizada a partir do grupo de imagens intensidade formado pelas polarizações HH, VV e CROSS (média entre HV e VH). Entretanto este desempenho não apresenta diferença estatística significativa ao nível de 5% de significância, se comparado com aqueles obtidos pelos grupos formados pelas imagens HH+CROSS e VV+CROSS e tampouco, com a inclusão da diversidade de atributos texturais investigados.

Na expectativa de aprimorar o mapeamento e monitoramento da paisagem amazônica, a partir da utilização de dados de banda X, sugere-se também investigar o uso da coerência interferométrica derivada dos dados multitemporais do COSMO-SkyMed, sub-modo HImage.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo -Projeto no. 2011/05917-4) pelo suporte financeiro, à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de pesquisa de pós-graduação, ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa de produtividade em pesquisa e à Telespazio pela disponibilização das imagens COSMO-SkyMed.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- Asner, G. P. 2001. Cloud cover in Landsat observations of the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 22: 3855-3862.
- Azevedo, A. R.; Gama, F. F.; Santos, J. R.; Mura, J. C.; Graça, P. L. A. 2012. Análise da integração de atributos de textura em imagens SAR Cosmo-Skymed como subsídio à classificação de uso e cobertura da terra. *Anais... X Seminário de Atualização em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas Aplicados à Engenharia Florestal*. Curitiba. Brasil. Curitiba: IEP. p. 221-228. ISSN 2178-8634. CD-ROM.
- Balzter, H. 2001. Forest mapping and monitoring with interferometric synthetic aperture radar (InSAR). *Progress in Physical Geography*, 25: 159-177.
- Becker, B. K. 2005. Geopolítica da Amazônia. *Estudos Avançados*, 19: 71-86.
- Garcia, C. E.; Santos, J. R.; Mura, J. C.; Kux, H. J. H. 2012. Análise do potencial de imagem TerraSAR-X para mapeamento temático no sudoeste da Amazônia brasileira. *Acta Amazônica*, 42: 205-214.
- Gomes, A. R.; Sadeck, L. W. R.; Brandão, W. S. Mapping land use cover in Amazon region with COSMO SkyMed data. *Proceedings... International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Munich. Germany. Munich: IEEE Press. p. 6539-6540. ISBN 978-1-4673-1160-1.
- Gonçalves, F. G.; Santos, J. R.; Treuhaft, R. N. 2011. Stem volume of tropical forests from polarimetric radar. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 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: 423-437.
- Graça, P. M. L. A.; Maldonado, F. D.; Fearnside, P. M. 2007. Detecção de desmatamento em novas áreas de expansão agropecuária no sul do Amazonas utilizando imagens CBERS-2. *Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis. Brasil. São José dos Campos: INPE. p. 917-924. ISBN 978-85-17-00031-7.
- Haralick, R. M.; Shanmugam, K.; Dinstein, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-3: 610-621.
- 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: 685-696.
- IBGE. 2010a. *Estado do Amazonas: Pedologia – Mapa Exploratório de Solos*. Rio de Janeiro: IBGE. 1 Mapa. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#GEOG>. Acesso em: 21/01/2012.
- _____. 2010b. *Estado do Amazonas: Vegetação*. Rio de Janeiro. 1 Mapa. Escala 1:250.000. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/default_prod.shtm#GEOG>. Acesso em: 21/01/2012.
- INMET. 2009. *Normais climatológicas do Brasil 1961-1990*. Brasília: INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima/mapas/?mapa=prec>>. Acesso em: 26/01/2012.
- Kasischke, E. S.; Melack, J. M.; Dobson, M. C. 1997. The use of imaging radars for ecological applications: A review. *Remote Sensing of Environment*, 59: 141-156.
- Kurvonen, L.; Hallikainen, M. T. 1999. Textural information of multitemporal ERS-1 and JERS-1 SAR images with applications to land and forest type classification in boreal zone. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37: 680-689.
- Le Toan, T.; Quegan, S.; Davidson, M.W.J.; Balzter, H.; Paillou, P.; Papathanassiou, K.; Plummer, S.; Rocca, F.; Saatchi, S.; Shugart, H.; Ulander, L. 2011. The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2850-2860.
- Martins, G. C.; Ferreira, M. M.; Curi, N.; Vitorino, A. C. T.; Silva, M. L. N. 2006. Campos nativos e matas adjacentes da região de Humaitá (AM): Atributos diferenciais dos solos. *Ciência e Agrotecnologia*, 30: 221-227.
- Paloscia, S.; Pettinato, S.; Santi, E. 2012. Combining L and X band SAR data for estimating biomass and soil moisture of agricultural fields. *European Journal of Remote Sensing*, 45: 99-109.
- Pinheiro, E. S.; Rezende, M. G. G. 2012. Análise do desflorestamento no sul do Amazonas. *ACTA Geográfica*, 6: 175-192.
- Saatchi, S.; Marlier, M.; Chazdon, R. L.; Clark, D. B.; Russell, A. E. 2011. Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2836-2849.
- Santos, J. R.; Freitas, C. C.; Araujo, L. S.; Dutra, L. V.; Mura, J. C.; Gama, F. F.; Soler, L. S.; Sant'anna, S. J. S. 2003. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, 87: 482-493.
- Sarker, M. L. R.; Nichol, J.; Ahmad, B.; Busu, I.; Rahman, A. A. 2012. Potential of texture measurements of two-date dual polarization PALSAR data for the improvement of

- forest biomass estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 69: 146–166.
- Soares, J. V.; Rennó, C. D.; Formaggio, A. R.; Yanasse, C. C. F.; Frery, A. C. 1997. An investigation of the selection of texture features for crop discrimination using sar imagery. *Remote Sensing of Environment*, 59: 234-247.
- Stolz, R.; Mauser, 1995. W. First evaluations of Shuttle SIR-C and X-SAR data for landcover classifications. *Proceedings... International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Firenze. Italy. Firenze: IEEE Press. p. 1058-1060. ISBN 0-7803-2567-2.
- Ulaby, F. T.; Kouyate, F.; Brisco, B.; Williams, T. H. L. 1986. Textural information in SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24: 235-245.
- 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 Environment*, 68: 26-40.
- Veloso, H. P.; Rangel-Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A. 1991. *Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal*. Rio de Janeiro: IBGE, 124p. ISBN: 85-240-0384-7.
- Yanasse, C. C. F.; Sant’anna, S. J. S.; Frery, A. C.; Rennó, C. D.; Soares, J. V.; Luckman, A. J. 1997. Exploratory study of the relationship between tropical forest regeneration stages and SIR-C L and C data. *Remote Sensing of Environment*, 59: 180-190.
- Weydahl, D. J.; Eldhuset, K. 2012. Combining polarimetric and coherence SAR images for forest type discrimination. *Proceedings... IX European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Nuremberg. Germany. Nuremberg: IEEE Press, p. 235-238.

Recebido em 31/01/2013

Aceito em 05/06/2013

