

MODELAGEM DE BIOMASSA EM FLORESTA PRIMÁRIA E SUCESSÃO SECUNDÁRIA A PARTIR DE DADOS ALOS/PALSAR E TERRASAR/TANDEM-X

BIOMASS MODELING IN PRIMARY FOREST AND SECONDARY SUCCESSION FROM ALOS/PALSAR AND TERRASAR/TANDEM-X DATA

Camila Valéria de Jesus Silva, João Roberto dos Santos, Lênio Soares Galvão

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 – São José dos Campos, SP, Brasil, camilas@dsr.inpe.br

RESUMO

Métodos confiáveis e práticos para a quantificação da biomassa aérea (AGB) na região amazônica podem ser aprimorados através da tecnologia dos sensores de radar. Neste trabalho, atributos polarimétricos em banda L (ALOS/PALSAR) e coerência interferométrica (na polarização HH) em banda X (TerraSAR/TanDEM-X) foram analisados com suporte de dados de inventário florestal e por regressão linear múltipla, permitindo modelar o estoque de biomassa. A modelagem envolveu dois tipos de modelos designados por: (1) PolSAR, ajustado para o conjunto “geral” de dados envolvendo todas as tipologias, e para o conjunto “específico” de dados somente de floresta primária (FP) e outro de sucessão secundária (SS); (2) PolSAR+InSAR “específico” ajustado para o conjunto de dados de SS. O modelo PolSAR específico para FP mostrou superioridade de desempenho ($R^2_{aj} = 0,74$; $RMSE = 65,69 \text{ t.ha}^{-1}$), comparado àqueles modelos PolSAR geral (FP+SS) e PolSAR específico SS. O modelo específico PolSAR+InSAR, que contém a coerência interferométrica, em sucessão secundária, comparado ao modelo PolSAR teve desempenho estatisticamente similar, com pequena superioridade ($R^2_{aj} = 0,86$; $RMSE = 17,02 \text{ t.ha}^{-1}$). Face aos resultados obtidos, considera-se que a modelagem específica de biomassa em floresta tropical produz melhores estimativas, e que a utilização da coerência InSAR é uma estratégia de elevado potencial na modelagem de biomassa em sucessão secundária.

Palavras-chave: Radar, modelagem de biomassa, Inventário florestal, Polarimetria, Coerência Interferométrica.

ABSTRACT

The role of the Amazon rainforest in the stock of terrestrial carbon is a topic of high relevance in the discussions on climate change. Reliable and practical methods for the quantification of aboveground biomass (AGB) in this region are enhanced by the radar sensor technology. In this work, polarimetric L-band attributes (ALOS/PALSAR) and the interferometric coherence (HH polarization) in X-band (TerraSAR/TanDEM-X) were analyzed with support of forest inventory data and multiple linear regressions, allowing modeling the biomass stock. The modeling involved two types of approaches : (1) PolSAR , adjusted for the "general" data involving all types , and the "specific" data set of primary forest (PF) or secondary succession (SS); (2) PolSAR+ InSAR "specific" adjusted to the secondary succession (SS) data set. The specific PolSAR model for FP showed superior performance ($R^2_{adj} = 0.74$, $RMSE = 65.69 \text{ t.ha}^{-1}$) compared to the PolSAR general models (FP+SS) and specific PolSAR SS. The specific model PolSAR+InSAR, containing the interferometric coherence in secondary succession, compared to the PolSAR model had statistically similar performance with small superiority ($R^2_{adj} = 0.86$, $RMSE = 17.02 \text{ t.ha}^{-1}$). Face to the results, it is considered that the specific modeling of biomass in tropical forest produces best estimates, and that the use of InSAR coherence is a strategy of great potential in the biomass modeling in secondary succession.

Keywords: Radar, Biomass modeling, Forest Inventory, Polarimetry, Interferometric coherence.

INTRODUÇÃO

Na Amazônia brasileira há uma significativa taxa de fragmentação do habitat decorrente das práticas de desflorestamento, sendo necessário atualizar o levantamento e monitoramento das condições florestais. Causas de perda do potencial edáfico e hídrico das terras, redução da biodiversidade e impacto nas condições

climáticas têm sido apontadas. Por outro lado, áreas anteriormente florestais convertidas em atividades de pecuária e abandonadas permitem o estabelecimento dos estádios sucessionais, com reestabelecimento dos estoques de carbono e das propriedades da ciclagem de nutrientes (VIEIRA *et al.*, 2003). Assim, algumas pesquisas foram realizadas investigando o estoque de biomassa em áreas de sucessões secundárias e de floresta primária, fazendo uso de atributos derivados de sensores-radar (SANTOS *et al.*, 2003; MITCHARD *et al.*, 2009; ENGLHART *et al.*, 2011; MOREL *et al.*, 2011).

É de fundamental importância conhecer e detalhar as características fisionômico-estruturais da vegetação, pois essas influenciam o mecanismo de retroespalhamento-radar, que por sua vez é dado em função da polarização e da frequência da onda eletromagnética (DOBSON *et al.*, 1995; SANTOS *et al.*, 2009). No caso específico da modelagem de biomassa florestal, existe uma variedade de estudos buscando essas relações com os dados de radar de distintos comprimentos de onda e polarizações. Gibbs *et al.* (2007) e Magnusson *et al.* (2007) ressaltaram que em banda L, do sensor PALSAR/ALOS-I, o mapeamento de tipologias florestais muito ricas em biomassa pode ser limitado devido à saturação do sinal. Por sua vez, Morel *et al.* (2011), citam que o desenvolvimento de algoritmos específicos para tratar dados polarimétricos podem capturar certas variações estruturais das florestas e, portanto, têm capacidade de estimar a biomassa de tipologias com maior acurácia. É importante citar também que há estudos mais aprofundados, envolvendo técnicas de fusão de dados SAR (*Sinthetic Aperture Radar*) em banda L com dados em banda X (ENGLHART *et al.*, 2011) e da interferometria SAR (TREUHAFT. *et al.*, 2010), com promissores resultados.

Os dados do sensor PALSAR vêm sendo utilizados para análise e modelagem de biomassa em florestas tropicais, mostrando bons resultados (MITCHARD *et al.*, 2009; CARREIRAS *et al.*, 2012; MARTINS, 2012). A continuidade de pesquisas abordando o uso deste sensor é o caminho da exploração técnico-científica para o recém-lançamento do satélite ALOS-II da JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*) com o sensor PALSAR, apontando para uma nova temporada de disponibilidade de dados aos usuários.

Além dos dados provenientes de sensores polarimétricos, os dados obtidos de interferometria SAR têm ocupado um espaço importante no contexto da modelagem de biomassa florestal. De acordo com Treuhaft *et al.* (1996), a coerência interferométrica é um dos atributos com elevado potencial para estimativas de parâmetros biofísicos da floresta. Devido à decorrelação volumétrica do sinal retroespalhado provocada pela vegetação, a coerência interferométrica é utilizada com a finalidade de obter mais informação sobre a estrutura e, conseqüentemente, sobre a estrutura florestal.

Com base na importância do estoque de carbono das florestas primárias e sucessões secundárias e na disponibilidade de ferramentas e dados do sensoriamento remoto por radar, este estudo teve o objetivo de realizar a modelagem da biomassa florestal em uma área da Amazônia comparando modelos polarimétricos PolSAR e modelos integrados PolSAR+InSAR.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área estudada compreende parte da Floresta Nacional do Tapajós – PA e os seus arredores, estando cerca de 60 km ao sul da cidade de Santarém, podendo ser acessada pela rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém). A área sob investigação está situada entre os paralelos 2^o53'12" e 3^o13'20" S e meridianos 54^o53'21" e 55^o04'53" W. O entorno da Flona Tapajós, sobretudo a leste, era caracterizado por atividades de pecuária e, mais recentemente, por uma forte conversão para atividades com agricultura mecanizada, e estabelecimento de extensos cultivos de milho, arroz, soja.

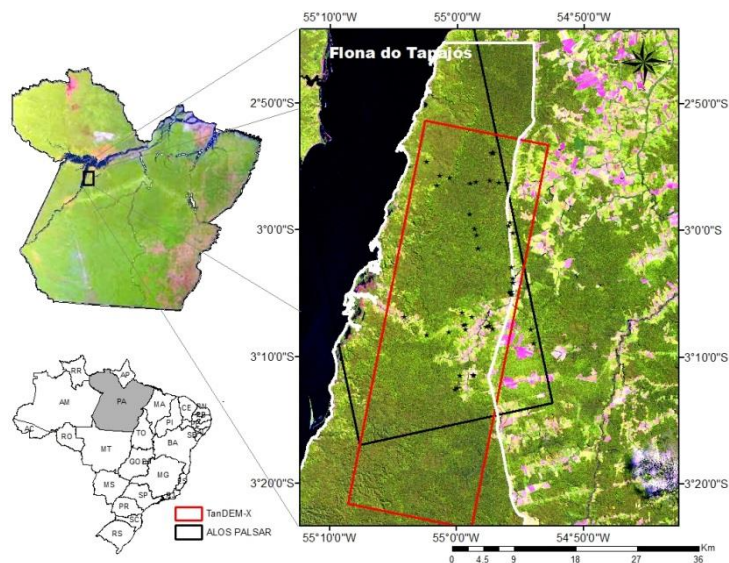


Figura 21. Localização da área de estudo no Estado do Pará, com destaque dos limites da área imageada pelo TanDEM-X (cor vermelha), pelo PALSAR (cor preta), da área da Flona (em branco) e plots amostrados destacados pelos pontos pretos. A imagem foi obtida pelo sensor TM/Landsat-5 em 2010 (composição colorida R5-G4-B3).

Figure 1. Study área localization in Para state, with the TanDEM-X and PALSAR scenes limits highlighted in red and black lines respectively. The Flona area is limited with the white line and the inventory plots are the black dots. The scene in the figure is a TM/Landsat-5 with a 543-RGB composition.

Dados de inventário florestal

A coleta dos dados de campo aconteceu em duas etapas. A primeira foi realizada na primeira quinzena do mês de agosto de 2012 e a segunda ocorreu no mesmo período de 2013. Foram instaladas parcelas de inventário florestal (Tabela 1) com a finalidade de capturar diferenças estruturais das tipologias definidas como: Floresta Primária – FP, Floresta primária com exploração madeireira – FPEM e estágios de Sucessão Secundária Avançada (SSA), Intermediária (SSInt) e Inicial (SSI). No decorrer da fase de inventário, as medições incluíram o diâmetro acima do peito (DAP), a altura comercial, a altura total e a localização das árvores mensuradas dentro da parcela indicada por coordenadas x e y em relação ao eixo do *transecto*. Também foi feita a identificação botânica. Nas parcelas de FP, FPEM e SSA, todos os indivíduos arbóreos com DAP ≥ 10 cm foram medidos. Nas parcelas de SSInt e SSI, indivíduos arbóreos com DAP ≥ 5 cm foram considerados para mensuração.

Tabela 8. Distribuição de amostras entre tipologias de floresta primária e sucessão secundária: floresta primária (FP), floresta primária com exploração madeireira (FPEM), sucessão secundária avançada (SSA), sucessão secundária intermediária (SSInt) e sucessão secundária inicial (SSI); identificação (ID), número de transectos instalados (N).

Table 1. Distribution of the samples for primary and secondary forest typologies: primary forest (FP); forest with timber exploitation (FPEM); advanced secondary succession (SSA); intermediate secondary succession (SSInt); and initial secondary succession (SSI), identification (ID), number of plots (N).

Tipologia	Parcela ID	N	Idade	Área total (ha)
FP	P4, P5, P21, P22, P23, P24, C1, C4, C12, C15, C24, C25, C26, C28	14	-	3,5
FPEM	P1, P2, P3, P15, P16, C2, C3, C10, C14	9	-	2,25
SSA	P7, P14, P20, P35, C11, C27, C29	7	> 15	1,75
SSInt	P6, P10, P17, P18, C5, C6, C7, C13, C19, C20, C21, C22	12	7 - 15	2,4
SSI	P11, P12, P13, P19, P33, P34, C8, C9, C18	9	< 7	1,35
Total	-	51	-	11,25

Dados de satélites

Os dados do imageamento da área de estudo foram extraídos de duas imagens derivadas de diferentes sensores ativos. Foi utilizada uma imagem *full*-polarimétrica do sensor PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*) de banda L, a bordo do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) e outra imagem da missão TanDEM-X de banda X (*TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurements*).

A aquisição das imagens SAR interferométricas utilizadas para a realização do presente estudo foi baseada no imageamento sequencial de dois satélites de características similares, que comportam o TanDEM e TerraSAR-X, numa conformação de imageamento *single-pass*, livre de decorrelação temporal e efeitos atmosféricos minimizados. Consequentemente, este dado é uma fonte rica para obtenção de informações sobre áreas de floresta tropical. O produto adquirido consistiu no co-registro de duas imagens no formato *single look complex* em alcance inclinado. No presente caso, as imagens de coerência interferométrica (derivadas das bandas HH e HH) empregadas foram cedidas pelo JPL (*Jet Propulsion Laboratory*), dentro do contexto de uma cooperação científica com o INPE, que processou o material resultante do imageamento sequencial.

Cálculo da Biomassa (AGB)

A biomassa acima do solo (AGB) foi definida como a soma das biomassas vivas secas individuais das espécies arbóreas. Foram selecionadas três equações alométricas com base na literatura para a estimativa da AGB (UHL *et al.*, 1988; NELSON *et al.*, 1999; CHAVE *et al.*, 2005). As equações alométricas foram empregadas em cada classe tipológica de acordo com o tipo de floresta em que foram ajustadas (primárias ou secundárias). Em virtude da ocorrência de dominância de espécies do gênero *Cecropia* em algumas parcelas, uma equação específica para essa espécie foi utilizada.

Correções e calibrações dos dados SAR

As imagens SAR passaram por procedimentos de correções e calibração radiométrica. A imagem PALSAR foi geometricamente corrigida através do processamento *mulilook*, que consiste na reamostragem da geometria alcance inclinado (*slant range*) para geometria de alcance no terreno (*ground range*). Posteriormente foi feita filtragem de ruído *speckle* com filtro de Lee modificado (LEE *et al.*, 1999), e correção radiométrica com fatores de conversão e calibração de Shimada (SHIMADA *et al.*, 2009).

Por sua vez, conforme mencionado anteriormente, o processamento inicial das imagens TerraSAR/TanDEM-X para a geração do atributo coerência interferométrica (γ_i) foi realizado no JPL, onde a fase do interferômetro na ausência de vegetação (*bare-earth phase*) foi calculada primeiramente para ser removida da coerência (correlação cruzada complexa). Assim, apenas a fase relacionada à altura da vegetação foi preservada. Em uma última etapa, para obtenção da coerência interferométrica (γ_i) na polarização HH sem o efeito da *bare-earth phase*, a partir da correlação cruzada normalizada $|C_N|$, foi realizada a calibração para remoção de ruído termal.

Extração de atributos

Foram extraídos um total de 22 atributos da imagem PALSAR, os quais foram divididos em três classes: atributos baseados no coeficiente de retroespalhamento radar (σ°); em Índices biofísicos, formulados por (POPE *et al.*, 1994), e aqueles derivados da informação de fase e que fazem parte das decomposições teóricas de alvos formulados por Cloude e Pottier (1996), Freeman e Durden (1998), e Touzi (2007). Optou-se por não georreferenciar nenhuma das duas imagens pra não incorrer em distorções que alterassem os valores dos atributos. Os valores dos atributos-radar extraídos corresponderam aos pixels contidos em cada ROI (Region Of Interest), representativa dos *plots* inventariados e georreferenciados em campo. Posteriormente foi calculada a média desses valores, as quais foram atribuídas para cada unidade amostral da tipologia florestal em estudo.

Modelagem por regressão linear múltipla

A modelagem integrando dados de biomassa (variável dependente Y) e de radar (variáveis independentes $X_n + \dots + X_{n-1}$) baseou-se em modelos lineares, os quais foram ajustados através do método dos Quadrados Mínimos Ordinários (*Ordinary Least Square – OLS*). Com o objetivo de avaliar a importância dos diversos atributos polarimétricos dessa modelagem da AGB e a contribuição da coerência interferométrica, foram ajustados dois tipos de modelos: um designado como PolSAR e outro como PolSAR+InSAR. No primeiro, as variáveis explicativas compreenderam apenas os atributos derivados das informações polarimétricas do PALSAR/ALOS-1. No segundo, a coerência interferométrica (TanDEM/ TerraSAR -X) foi adicionada ao conjunto de variáveis explicativas polarimétricas. Para efeito da análise comparativa, os modelos PolSAR e PolSAR+InSAR foram comparados em relação à qualidade do ajustamento (R^2 , R^2_{aj} , SQR e RMSE). Duas comparações foram feitas, uma entre modelos PolSAR para avaliar se há melhor ajuste quando são considerados todos os dados (FP+SS) ou apenas um conjunto de dados específicos (FP ou SS); e outra entre um modelos PolSAR e PolSAR+InSAR específicos para SS.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seleção de modelos

O inventário florestal permitiu uma detalhada análise florístico-estrutural das tipologias, cuja série de informações estão descritas em Silva (2014). Como o presente artigo tem foco na biomassa, relata-se que os levantamentos realizados permitiram obter estimativas de $340,56 \pm 103,78$ (t.ha⁻¹) para FP, $242,17 \pm 71,86$ (t.ha⁻¹) para FPEM, $107,50 \pm 27,07$ (t.ha⁻¹) para SSA, $56,34 \pm 17,53$ (t.ha⁻¹) para SSInt e $14,59 \pm 5,90$ (t.ha⁻¹) para SSI.

O desempenho dos modelos PolSAR de acordo com as medidas avaliadoras tomadas para o conjunto de amostras de treinamento encontra-se descrito na Tabela 2. O ajuste do modelo polarimétrico com dados apenas de FP diminuiu o RMSE e aumentou o R^2 e R^2_{aj} , comparado com as resultantes do modelo geral. Já os valores de R^2 e R^2_{aj} do modelo SS foram inferiores àqueles do modelo geral. Os valores de Cp de Mallow e AIC foram tomados, pois são medidas que refletem o desempenho dos modelos sem ter a influência do número de variáveis explicativas (KUTNER *et al.*, 2005). De acordo com esses valores os modelos específicos SS e FP tiveram desempenho superior ao modelo geral (FP+SS).

Tabela 2. Desempenho dos modelos PolSAR obtidos. NP é o número de parâmetros incluindo a constante; N é o número total de amostras (treinamento + validação); R^2 é o coeficiente de determinação; R^2_{aj} é o coeficiente de determinação ajustado; SQR é a soma dos quadrados dos resíduos; RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio; Cp é o critério Cp de Mallow; e AIC é o critério de informação de Akaike. Todos os modelos foram significativos ($p < 0,001$).

Table 2. Performance of the PolSAR models. NP: number of parameters plus the constant; N: total number of samples (training+validation); R^2 : coefficient of determination; R^2_{aj} : adjusted coefficient of determination; SQR: sum of squared errors; RMSE: root mean squared error; Cp: Mallow Cp criteria; AIC: Akaike criteria. All models had significant p value ($p < 0,001$).

Modelos	Np	N	p	R^2	R^2_{aj}	SQR	RMSE	Cp	AIC
PolSAR geral	6	50	0,000	0,74	0,70	230259,71	75,87	5,38	409,75
PolSAR FP	3	23	0,000	0,79	0,74	45451,85	50,25	-6,77	168,54
PolSAR SS	3	27	0,000	0,69	0,64	9180,49	20,91	-0,91	151,38

Os modelos específicos para SS apresentaram desempenho muito similar. O diagnóstico realizado a partir dos parâmetros estatísticos (Tabela 3) mostra valores ligeiramente inferiores de SQR, RMSE, Cp e AIC para o modelo PolSAR+InSAR em relação ao modelo PolSAR. Assim como, os valores de R^2 e R^2_{aj} do modelo PolSAR+InSAR, são ligeiramente maiores aos do modelo PolSAR.

Tabela 3. Descrição do desempenho dos modelos PolSAR e PolSAR+InSAR para as sucessões secundárias (SS). Todos os modelos foram significativos ($p < 0,001$).

Table 3. Performance description of the PolSAR and PolSAR+InSAR models for secondary succession (SS). All models had significant p value ($p < 0,001$).

Modelos	Np	N	R ²	R ² aj	SQR	RMSE	Cp	AIC
PolSAR SS	2	24	0,84	0,82	3296,38	11,97	1,92	114,14
PolSAR+InSAR SS	3	24	0,86	0,83	2676,77	11,87	1,79	107,14

Validação

Foram retidos para validação aqueles modelos com maior R² e R²aj. Na comparação entre modelos PolSAR o modelo selecionado foi o modelo específico para FP:

$$AGB = -303,99 - 99,66 * \sigma^{\circ}HH + 1262,81 * Pd - 3,84 * \alpha_{s2}$$

Onde $\sigma^{\circ}HH$ é o coeficiente de retroespalhamento HH, Pd é a componente de espalhamento *double-bounce* e α_{s2} é a segunda componente da magnitude do espalhamento de Touzi (2007). A validação deste modelo apresentou RMSE = 65,69 t.ha⁻¹, o que corresponde a 22% da média (300,01 t.ha⁻¹) dos valores observados no conjunto de amostras de validação. O erro absoluto médio foi de 59,03 t.ha⁻¹ (20% da média). Este resultado é comparável a outros estudos similares realizados na mesma região como o de Bispo *et al.* (2014), que ao realizar a estimativa de biomassa através de um modelo polarimétrico em floresta primária obteve RMSE de 50,6 t.ha⁻¹ (23% da média).

Na comparação entre o modelo PolSAR e o PolSAR+InSAR para SS, o modelo selecionado foi o modelo específico PolSAR+InSAR:

$$AGB = 81,76 - 120,15 * \gamma_i + 421,70 * Pv + 0,41 * \phi_{s1}$$

Onde γ_i é a coerência interferométrica, Pv é a componente de espalhamento volumétrica e ϕ_{s1} é a primeira componente da fase do espalhamento de Touzi (2007). O RMSE obtido na validação foi de apenas 17,02 t.ha⁻¹, correspondendo a 33% da média dos valores observados. De acordo com o baixo erro obtido e com os altos valores de R² (0,86) e R²aj (0,83), nota-se que o modelo melhorou a precisão na estimativa da biomassa. Este modelo mostra que melhores resultados foram obtidos com ajuste realizado especificamente para dados de SS e também com a inclusão da variável explicativa coerência interferométrica do TerraSAR/TanDEM-X. Apesar do desempenho dos modelos PolSAR e PolSAR+InSAR em SS terem sido muito similares, notou-se uma ligeira superioridade deste em que a variável interferométrica estava entre as variáveis explicativas. Estudos apontam que a combinação de dados SAR pode ser uma opção para melhorar as estimativas de AGB, principalmente em intervalos menores de valores, como em estágios sucessionais, dado que para baixos valores de biomassa o erro tende a ser alto com o uso apenas dos dados derivados do sensor ALOS/PALSAR (ENGLHART *et al.*, 2011; MARTINS, 2012).

De acordo com Treuhaft e Siqueira (2000), ambos os atributos InSAR e PolSAR variam quando há variação dos parâmetros da estrutura vertical da vegetação sugerindo que a combinação de dados InSAR e PolSAR, inclusive PolInSAR, pode contribuir mais ainda para obtenção de melhores estimativas de parâmetros estruturais do que cada qual individualmente.

CONCLUSÕES

Na modelagem derivada de atributos polarimétricos, melhores estimativas de biomassa foram obtidas para a floresta primária (FP) com um modelo específico, comparado àquele modelo PolSAR composto de dados integrado de floresta primária e de sucessão secundária (FP + SS).

A combinação de dados-radar num modelo integrador de bandas L e X PolSAR+InSAR é uma estratégia com elevado potencial para estimativas de biomassa em floresta tropicais, sendo recomendável novos

experimentos face a complexidade da paisagem Amazônica. Dessa forma, conclui-se que a utilização do atributo coerência interferométrica (γ_i) em banda X, derivada da missão TanDEM com suas peculiares características de imageamento, é uma boa alternativa para estudos que se propõem investigar as sucessões secundárias, gerando estimativas de biomassa com boa precisão, úteis aos estudos regionais e globais do papel da regeneração da floresta na ciclagem do carbono.

REFERÊNCIAS

- BISPO, P.C. *et al.* Integration of Polarimetric PALSAR Attributes and Local Geomorphometric Variables Derived from SRTM for Forest Biomass Modeling in Central Amazonia Integration of Polarimetric PALSAR A. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 40, n. 1, p. 26-42, 2014.
- CARREIRAS, J.M.B. *et al.* Understanding the relationship between aboveground biomass and ALOS PALSAR data in the forests of Guinea-Bissau (West Africa). *Remote Sensing of Environment*, v. 121, p. 426–442, 2012.
- CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, v. 145, n. 1, p. 87-99, 2005.
- CLOUDE, S.R. *et al.* A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 34, n. 2, p. 498-518, 1996.
- DOBSON, M.C. *et al.* Estimation of Forest Biophysical Characteristics in Northern Michigan with SIR-C / X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 33, n. 4, p. 877-895, 1995.
- ENGLHART, S. *et al.* Aboveground biomass retrieval in tropical forests — The potential of combined X- and L-band SAR data use. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 5, p. 1260-1271, 2011.
- FREEMAN, A.; DURDEN, S.L. A Three-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 3, p. 963–973, 1998.
- GIBBS, H.K. *et al.* Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, v. 2, n. 4, p. 045023, 2007.
- KUTNER, M.H. *et al.* *Applied Linear Statistical Models*. 5th. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 1396 pp. 2005.
- LEE, J. *et al.* Polarimetric SAR Speckle Filtering and Its Implication for Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 37, n. 5, p. 2363-2373, 1999.
- MAGNUSSON, M. *et al.* Estimation of forest stem volume using ALOS PALSAR satellite images. In: 2007 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Ieee, 2007. p. 4343-4346
- MARTINS, F. DA S.R.V. Caracterização e estimativa de biomassa aérea de florestas atingidas pelo fogo a partir de imagens polarimétricas ALOS/PALSAR. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2012.
- MITCHARD, E.T.A. *et al.* Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes. *Geophysical Research Letters*, v. 36, n. 23, p. L23401, 2009.
- MOREL, A.C. *et al.* Estimating aboveground biomass in forest and oil palm plantation in Sabah, Malaysian Borneo using ALOS PALSAR data. *Forest Ecology and Management*, v. 262, n. 9, p. 1786-1798, 2011.
- NELSON, B.W. *et al.* Allometric regressions for improved estimate of secondary forest biomass in the central Amazon. *Forest Ecology and Management*, v. 117, n. 1-3, p. 149-167, 1999.
- POPE, K.O. *et al.* Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, v. 48, n. 2, p. 205-219, 1994.
- SANTOS, J.R. *et al.* Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, n. 4, p. 482-493, 2003.
- SANTOS, J.R.; NARVAES, I. DA S.; GRAÇA, P.M.L.A.; GONÇALVES, F.G. Polarimetric responses and scattering mechanisms of tropical forests in the Brazilian Amazon. In: JEDLOVEC, G. (Org.). *Advances on*

geoscience and remote sensing. 1. ed. Vukovar, Croatia: NASA/MSFC-USA, 2009. p. 183-206.

SHIMADA, M. *et al.* PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 47, n. 12, p. 3915-3932, 2009.

TOUZI, R. Target Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 45, n. 1, p. 73-84, 2007.

TREUHAF, R.N. *et al.* Biomass estimation in a tropical wet forest using Fourier transforms of profiles from lidar or interferometric SAR. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 23, p. n/a–n/a, 2010.

TREUHAF, R.N. *et al.* Vegetation characteristics and underlying topography from interferometric radar. *Radio Science*, v. 31, n. 6, p. 1449-1485, 1996.

TREUHAF, R.N.; SIQUEIRA, P.R. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Science*, v. 35, n. 1, p. 141-177, 2000.

UHL, C. *et al.* Abandoned Pastures in Eastern Amazonia. I . Patterns of Plant Succession. *Journal of Ecology*, v. 76, n. 3, p. 663-681, 1988.

VIEIRA, I.C.G. *et al.* Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. *Remote Sensing of Environment*, v. 87, n. 4, p. 470-481, 2003.