

APLICAÇÃO DE PARÂMETROS POLARIMÉTRICOS E INTERFEROMÉTRICOS DERIVADOS DE IMAGENS ALOS/PALSAR-2 PARA A ESTIMATIVA DE VOLUME DE MADEIRA EM FLORESTAS PLANTADAS DE *EUCALYPTUS* sp. *PINUS* sp.

Juliana Maria Ferreira de Souza Diniz¹, Fabio Furlan Gama², Aliny Aparecida dos Reis³, Cleber Gonzales de Oliveira⁴

^{1,2}Coordenação de Observação da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, São Paulo, Brasil; ¹juliana.diniz@inpe.br; ²fabio.furlan@inpe.br; ³Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, Brasil; alinyreis@hotmail.com; e ⁴VISIONA Tecnologia Espacial S.A., São José dos Campos, São Paulo, Brasil, cleber.oliveira@visionaespaical.com.br

RESUMO

Aliando sensoriamento remoto com informações de campo é possível extrapolar dados de inventário florestal de forma espacial. Além dos dados ópticos, os dados de radares têm sido cada vez mais empregados para estimativas de parâmetros florestais, como volume de madeira. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar o potencial da utilização de variáveis polarimétricas e interferométricas derivadas de imagens PALSAR-2 (ALOS-2) para estimativa de volume de madeira em plantios comerciais de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.. A modelagem foi realizada utilizando o algoritmo Random Forest (RF) e as variáveis provenientes do coeficiente de retroespalhamento, de decomposições polarimétricas e da coerência interferométrica, considerando modelos específicos para cada espécie e um modelo genérico para ambas as espécies. Foi possível observar o potencial da coerência interferométrica para a estimativa dos modelos específicos, com os melhores resultados. Para o modelo genérico, a utilização de todas as variáveis em conjunto apresentou o melhor desempenho.

Palavras-chave — coerência interferométrica, decomposições polarimétricas, Random Forest, machine learning.

ABSTRACT

Combining remote sensing with field information, it is possible to extrapolate forest inventory data spatially. In addition to optical data, radar data has been increasingly used for estimating forest parameters such as wood volume. Thus, the objective of this work was to evaluate the potential of using polarimetric and interferometric attributes of PALSAR-2 (ALOS-2) data to estimate wood volume in commercial plantations of *Eucalyptus* sp. and *Pinus* sp. The modeling was performed using the Random Forest (RF) algorithm and variables from the backscatter coefficient, polarimetric decompositions and interferometric coherence, considering specific models for each species and a generic model for both species. It was possible to observe the interferometric coherence potential for the estimation of specific models, with the best results. For the generic model,

the use of all variables together showed the best performance.

Key words — interferometric coherence, polarimetric decompositions, Random Forest, machine learning.

1. INTRODUÇÃO

A demanda por florestas plantadas de curta-rotação tem crescido em todo o planeta, sendo relacionada, principalmente, com o mercado de biomassa e a produção de biocombustíveis. Nesse caso, a produção de madeira é o principal serviço ecossistêmico dessas plantações [1].

O monitoramento de florestas comerciais é realizado através de inventários florestais anuais, com o objetivo de avaliar o estoque de madeira para gerenciamento sustentável e planejamento de suprimentos atuais e futuros de madeira [2, 3]. Os inventários florestais demandam tempo, mão-de-obra, apresentam um alto custo e limitações para grandes áreas [4]. Nesse sentido, estudos de técnicas que possibilitem estimativas precisas dos parâmetros biofísicos das florestas e a sua distribuição espacial, tais como volume de madeira, têm sido cada vez mais frequentes.

Através de dados de sensoriamento remoto, combinados com as informações de campo, é possível extrapolar os dados de inventário florestal de forma espacial, abrangendo toda a área de interesse, o que permite preencher a lacuna de informações quando são utilizados apenas os dados de campo [4,5]. Os dados de radares têm sido explorados por apresentarem pouca influência da atmosfera e serem sensíveis à estrutura florestal, devido à sua capacidade de penetração no dossel, que varia de acordo com o comprimento de onda utilizado [6]. Dentre as informações extraídas das imagens SAR (*Synthetic Aperture Radar*) têm-se os coeficientes de retroespalhamento (σ^0), decomposições polarimétricas, e coerência interferométrica, que podem ser relacionadas com volume e biomassa [7].

Desse modo, o objetivo desse estudo foi avaliar a utilização dos parâmetros polarimétricos e interferométricos derivados de imagens PALSAR-2 para estimativa de volume de madeira em plantios comerciais de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Telêmaco Borba, na região centro-oeste do estado do Paraná (Figura 1), que corresponde a uma das áreas de operação da Empresa de Papel e Celulose Klabin S.A.. A área compreende plantios de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., que juntos totalizam 2.869,2 ha, sendo 2.173,5 ha (153 talhões) de *Eucalyptus* sp. e os 695,7 ha restantes (108 talhões) de *Pinus* sp.

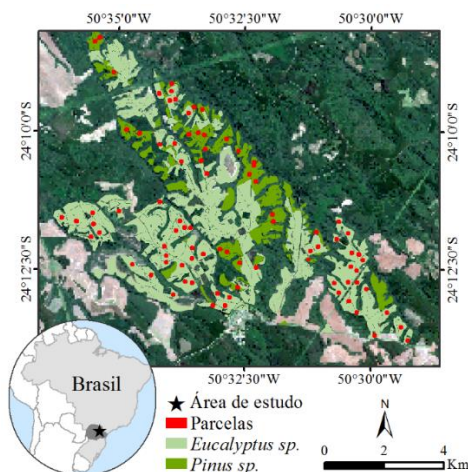


Figura 1. Área de estudo no estado do Paraná, Brasil, com a distribuição dos talhões de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. e as 85 parcelas do inventário florestal. (Imagem base: Sentinel-2 (RGB 432)).

2.2 Base de dados e pré-processamento

Os dados de campo foram adquiridos entre março e abril de 2019 e consistem em 85 parcelas (Figura 1), sendo 58 de *Eucalyptus* sp. e 27 de *Pinus* sp. Em cada parcela foram medidos o diâmetro à altura do peito (DAP) e altura das quinze árvores dominantes. A Tabela 1 apresenta os valores médios de idade e volume obtidos a partir do inventário florestal.

Variável	<i>Eucalyptus</i> sp.		<i>Pinus</i> sp.	
	Média	Amplitude	Média	Amplitude
Idade (anos)	3,6	1,4 - 6,8	9,9	5,4 - 15,0
Volume (m ³ /ha)	203,5	15,0- 432,0	253,4	98,0 - 461,0

Tabela 1. – Estatísticas descritivas das variáveis obtidas com o inventário florestal. Onde: DAP= Diâmetro a Altura do Peito (cm).

As imagens do PALSAR-2, que opera em banda L, foram adquiridas pela Agência Espacial Japonesa (JAXA) nos dias 28/04/2019 e 12/05/2019. As imagens foram adquiridas no modo *StripMap*, em geometria de alcance inclinado, formato *Single Look Complex*, com as quatro polarizações (HH, HV, VH e VV).

A etapa de pré-processamento foi realizada no *software* SNAP (*Sentinel Applications Plataforma*). Com o objetivo de reduzir o ruído *Speckle* foi aplicado a técnica *Multilooking*

com 2 looks em range e 5 looks em azimute e o filtro Lee com uma janela 3x3 pixels.

Foram obtidos os valores de σ^0 e as decomposições polarimétricas de Cloude e Pottier [11]; Freeman-Durden [12]; Yamagushi et al. [13] e Van Zyl [14], a partir da imagem coletada na data de 28/04/2019. Os coeficientes foram obtidos através da calibração radiométrica apresentada na Equação 1 [8]. A partir dos coeficientes de retroespalhamento foram calculadas as razões de Polarização Paralela (RP) e de Polarização Cruzada (RC) [9], bem como os índices propostos por Pope [10], Índice de Biomassa (BMD); Índice de Estrutura da Copa (CSI) e Índice de Espalhamento Volumétrico (VSI).

$$\sigma^0 = 10 \cdot \log_{10} (I^2 + Q^2) + CF - A \quad (1)$$

Em que: I: *in phase*; Q corresponde a quadratura; CF corresponde ao fator de calibração e A corresponde ao fator de conversão igual a 32.

Por fim, foi realizado o corregristo entre as duas cenas coletadas nas datas de 28/04/2019 e 12/05/2019, com uma janela 10x3 e em seguida foram calculadas as coerências interferométricas (Equação 1), onde S1 e S2 representam as duas imagens complexas corregristadas e $\langle \rangle$ denota a média em relação ao tamanho da janela (10x3).

$$\gamma = \frac{|\langle S_1(x)S_2(x)^* \rangle|}{\sqrt{\langle |S_1(x)|^2 \rangle \langle |S_2(x)|^2 \rangle}} \quad (2)$$

A correção do terreno foi aplicada para todas as variáveis, utilizando-se para isso o Modelo Digital de Elevação obtido da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com 30 m de resolução espacial.

2.3 Modelagem

Foram definidos quatro cenários para avaliar a contribuição das variáveis provenientes das imagens polarimétricas coletadas pelo PALSAR-2 para estimativa de volume de madeira (Tabela 2). Cada um dos cenários foi aplicado considerando-se modelos específicos por espécie (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.) e um modelo genérico, englobando as duas espécies.

Para realizar a modelagem foram extraídas as médias dos valores dos pixels presentes em cada parcela, para cada uma das variáveis predictoras. O algoritmo de aprendizagem de máquina *Random Forest* (RF) [15] foi empregado. Os parâmetros “número de árvores de decisão” (*n_{tree}*) e “número de variáveis a serem testadas em cada nó” (*m_{try}*) foram otimizados por meio do método de validação cruzada k-fold (k=5) [16].

Cenários	Variáveis	Nº variáveis
C1	σ^0 , índices de Pope e Razões	9
C2	Decomposições polarimétricas	13
C3	Coerências Interferométricas	3
C4	Todas as variáveis	25

Tabela 2. Cenários utilizados para avaliar o potencial das variáveis derivadas das imagens polarimétricas PALSAR-2.

Para avaliar a acurácia dos modelos foram utilizados a Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE) e o coeficiente de determinação (R^2).

3. RESULTADOS

Foi possível observar que as variáveis avaliadas apresentaram diferentes comportamentos em relação aos modelos analisados (Tabela 3). O Cenário 1, utilizando apenas os dados provenientes dos σ^0 índices de Pope e Razões, apresentou o melhor desempenho quando aplicado ao modelo específico do *Pinus* sp., com 57,2% de R^2 .

Cenários		Modelos		
		<i>Eucalyptus</i> sp.	<i>Pinus</i> sp.	Genérico
C1	RMSE %	61,5	35,9	52,9
	R^2 %	4,1	57,2	18,0
C2	RMSE %	54,7	47,1	50,8
	R^2 %	5,3	3,5	36,2
C3	RMSE %	47,4	12,7	52,3
	R^2	36,7	92,1	18,9
C4	RMSE %	55,6	16,5	45,4
	R^2	10,3	90,6	49,5

Tabela 3. Resultados da modelagem para cada cenário, considerando-se os modelos específicos e genérico.

Já o Cenário 2, utilizando as decomposições polarimétricas apresentou um R^2 de 36,2% para o modelo genérico, enquanto para os modelos específicos os resultados foram de 5% e 3%, para os modelos de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., respectivamente.

Utilizando-se as coerências interferométricas (C3), nota-se um resultado promissor para os modelos específicos, com um R^2 de 37% para *Eucalyptus* sp., e de 92% para *Pinus* sp.. Porém, o modelo genérico apresentou um R^2 de 19%.

O Cenário 4, que empregou todas as variáveis obtidas com o PALSAR-2, apresentou o melhor resultado considerando-se o modelo genérico, com um R^2 de 49,5%, o que representou um aumento de 13,3% em relação ao cenário 2, que obteve o segundo melhor desempenho para o modelo genérico.

A estimativa para área total foi realizada para cada modelo, considerando-se os cenários que apresentaram os melhores desempenhos. Para a aplicação do modelo genérico, considerou-se o modelo obtido no Cenário 4, enquanto para as estimativas por espécie empregou-se os modelos obtidos no Cenário 3 (Figura 2).

Observa-se ainda, que o modelo específico para *Pinus* sp. apresentou uma amplitude de estimativa similar a observada nos dados do inventário, variando de 134,3 m³/ha a 409,4 m³/ha. Já o modelo do *Eucalyptus* sp., estimou o volume variando entre 55,8 m³/ha a 298,2 m³/ha, o que foi um pouco discrepante dos dados obtidos com o inventário (15 m³/ha a 432 m³/ha).

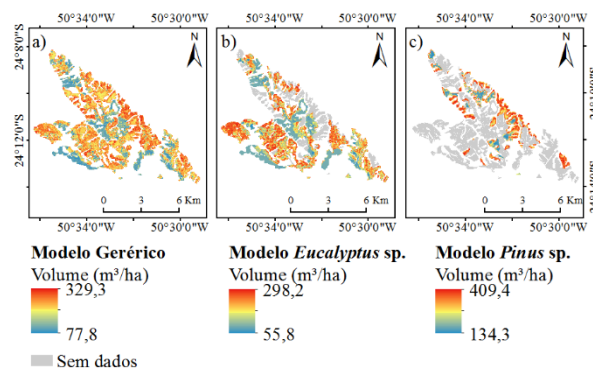


Figura 2. Distribuição espacial do volume estimado (m³/ha) com os melhores modelos. a) Modelo Genérico, baseado no cenário C4; b) Modelo *Eucalyptus* sp., baseado no cenário C3; c) Modelo *Pinus* sp., baseado no cenário C3.

As variáveis de importância do RF foram obtidas para o modelo genérico, que utilizou todas as variáveis derivadas das imagens polarimétricas PALSAR-2 (C4) (Figura 3).

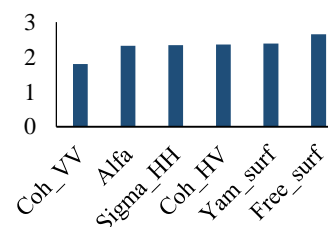


Figura 3. Cinco variáveis com maior importância para o modelo Genérico (C4): Espalhamento superficial de Freeman-Durden (Free_surf); espalhamento superficial de Yamagushi (Yam_surf); Coerência Interferométrica na polarização HV (Coh_HV); σ^0 na polarização HH (Sigma_HH); Ângulo Alfa da decomposição de Cloude-Pottier (Alfa) e Coerência Interferométrica na polarização VV (Coh_VV).

Nota-se que as componentes do espalhamento superficial das decomposições de Yamagushi e Freeman-Durden, apresentaram as maiores importâncias para o modelo, seguidas da coerência interferométrica na polarização HV.

4. DISCUSSÃO

As coerências interferométricas tiveram uma grande importância na estimativa de volume, principalmente considerando-se os modelos específicos. Além disso, a coerência foi uma variável que esteve entre as mais importantes no modelo genérico (Figura 3). A coerência interferométrica é inversamente relacionada ao aumento de biomassa em uma área florestal [17]. Além disso, ela é influenciada por fatores como constante dielétrica, efeitos do terreno, frequência do radar e pela decorrelação temporal e volumétrica entre as duas imagens SAR [18].

A partir da estimativa, notou-se que os modelos apresentaram melhores resultados para *Pinus* sp. do que para *Eucalyptus* sp. Os plantios de *Eucalyptus* sp. apresentam uma maior variação nas espécies e clones utilizados, o que pode impactar na obtenção de acurácias

mais precisas. Além disso, esse fato pode estar relacionado com a diferença de idade entre os plantios de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. A partir dos dados do inventário florestal observou-se que os plantios de *Eucalyptus* sp. são plantios mais jovens, sendo grande parte das parcelas com 1,6 anos. Já os plantios de *Pinus* sp., são plantios mais velhos, com parcelas distribuídas predominantemente entre 5,7 anos e 13,5 anos. Áreas mais velhas irão apresentar copas mais densas, e árvores com um maior diâmetro e volume. Desse modo, nota-se uma diferença na resposta do radar, que está diretamente relacionada à estrutura dos plantios. Os plantios de *Eucalyptus* sp. por serem mais jovens, podem apresentar áreas com maiores exposições do solo, o que pode estar relacionado à alta contribuição do espalhamento superficial, observada ao aplicar-se o modelo genérico. Assim como, na alta importância da coerência interferométrica relacionada ao modelo de *Pinus* sp.

5. CONCLUSÕES

A partir da avaliação das diferentes contribuições das variáveis polarimétricas e interferométricas foi possível entender quais as melhores variáveis para serem utilizadas para estimativa de volume de madeira, considerando-se modelos específicos por espécie (*Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.) e genérico englobando as duas espécies. As variáveis da coerência interferométrica se destacaram principalmente ao serem utilizadas nos modelos específicos. Já para o modelo genérico, foi necessário empregar todas as variáveis para obter as melhores estimativas.

A estimativa para *Pinus* sp. apresentou resultados superiores de R^2 (92%), quando comparadas com *Eucalyptus* sp. (36%). Desse modo, deve-se buscar outras técnicas e/ou abordagens para uma melhor estimativa dos plantios de *Eucalyptus* sp., assim como no modelo genérico.

Destaca-se que as variáveis provenientes das imagens polarimétricas PALSAR-2 apresentaram um grande potencial para estimativa de volume de madeira e podem ser exploradas em estudos futuros.

8. REFERÊNCIAS

- [1] T. Gao, et al. Timber production assessment of a plantation forest: An integrated framework with field-based inventory, multi-source remote sensing data and forest management history. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.52, p.155-165, 2016.
- [2] R. Ismail et al. Assessing the Utility of ALOS PALSAR and SPOT 4 to Predict Timber Volumes in Even-Aged Eucalyptus Plantations Located in Zululand, South Africa. *Southern Forests: A Journal of Forest Science*, v. 77, n.3, p. 203–211, 2015.
- [3] M. R. Raimundo. Geostatistics Applied to Growth Estimates in Continuous Forest Inventories. *Forest Science*, v. 63, n.1, p. 29-38, 2017.
- [4] C. Boisvenue et al. Integration of Landsat time series and field plots for forest productivity estimates in decision support models. *Forest Ecology and Management*, v.376, p. 284-297, 2016.

[5] I. Fayad, I. et al. Aboveground biomass mapping in French Guiana by combining remote sensing, forest inventories and environmental data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 52, p.502–514, 2016.

[6] I. Ali et al. Review of machine learning approaches for biomass and soil moisture retrievals from remote sensing data. *Remote Sensing*, v. 7, p.16398–16421, 2015.

[7] G. S. A. Souza et al. Multi-sensor prediction of Eucalyptus stand volume: A support vector approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 156, p. 135-146, 2019.

[8] M. Shimada et al. PALSAR Radiometric and geometric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, v.47, n.12, p. 3915-3932, 2009.

[9] F. M. Henderson and A. J. Lewis. *Principles and applications of imaging radar, manual of remote sensing*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1998. 866 p.

[10] K. O. Pope; J. M. Rey-Benayas, and J. F. PARIS. Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the central American tropics. *Remote Sens. Environ.* v. 48, p. 205–219, 1994.

[11] S. R. Cloude and E. Pottier. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.34, n. 2, p.498-518, 1996.

[12] A. Freeman and S. L. 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.

[13] Y. Yamaguchi et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* v. 43, n.8, p. 1699-1706, 2005.

[14] J. J. Van Zyl; M. Arii, M. and Kim, Y. Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. v. 49, p. 3452–3459, 2011.

[15] L. Breiman. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.

[16] C. Wu et al. Comparison of machine-learning methods for above-ground biomass estimation based on Landsat imagery. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 10, n. 3, p. 035010, 2016.

[17] U. Wegmüller and C. WERNER. Retrieval of vegetation parameters with SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 35, n. 1, p. 18- 24, 1997.

[18] M. Borgeaud, M. and U. Wegmueller, U. On the use of ERS SAR interferometry for retrieval of geo and biophysical information. In: *Esa workshop on applications of ERS Sar interferometry*, Zurich. Proceedings...1996.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Empresa de Papel e Celulose Klabin S.A., por fornecer os dados do inventário florestal e a Empresa Visiona Tecnologia Espacial S.A. por fornecer as imagens polarimétricas PALSAR-2. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.