

Uso de imagens ALOS para estimar parâmetros biofísicos em plantações de eucaliptos

Daniel Henrique Ferreira Fernandes¹

Vicente Paulo Soares²

Fernando Soares de Oliveira²

Carlos Antonio Álvares Soares Ribeiro²

José Marinaldo Gleriani²

Universidade Federal de Viçosa - UFV

Av. P.H. Rolfs, s/n - 36.570-000 - Viçosa-MG, Brasil

Departamento de Engenharia Civil – Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica¹

Departamento de Engenharia Florestal²

{daniel.fernandes, vicente, cribeiro, gleriani, fernando.oliveira}@ufv.br

Abstract. This study evaluated the potential use of radar and optical data for estimate biophysical parameters using multivariate regression techniques. Images were obtained from radar (PALSAR) and optical (AVNIR-2 and PRISM) sensors aboard the ALOS satellite, in areas of eucalyptus production located in Vale do Rio Doce, state of Minas Gerais, Brazil, belonging to CENIBRA. The estimated variables were age, dominant and mean heights, diameter at breast height, basal area, stem number, volume and biomass, from 50 samples with area around 300m² each. For dendrometric parameters prediction it was used a first-order regression model. In order to estimate the dependent variables, they were used attributes radar (backscatter coefficients; parallel and cross polarized rations; total power; biomass, canopy structure and volume scattering indexes) and optical (digital numbers of each band of sensors AVNIR-2 and PRISM, and vegetation indexes). In general, the optical attributes presented correlation values with biophysical parameters above the radar, and had lower dispersion, which may be due to the greater complexity of interaction of the radar signal with the vegetation. The correlation coefficients after selecting the best variables (technique Stepwise) and adjusting the models ranged between 50.93% and 85.73%. The relative errors obtained in the dendrometric parameter estimates from 50 samples ranged between 0.05% and 29.13%. The results achieved in this study support the hypothesis that data coming from PALSAR, PRISM and AVNIR-2 sensors can be used to quantify biophysical variables in eucalyptus plantations.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, satellite ALOS, biophysical parameters for eucalyptus; sensoriamento remoto, processamento de imagens, satélite ALOS, parâmetros biofísicos de eucaliptos.

1. Introdução

Parâmetros biofísicos são importantes descritores de florestas nativas ou plantadas e sua predição tem sido realizada com sucesso por meio de dados de sensoriamento remoto advindos de sensores radar e/ou ópticos.

Diversas pesquisas vêm sendo conduzidas a fim de se estimar parâmetros biofísicos de florestas empregando dados SAR (*Synthetic Aperture Radar*), sobretudo, nas bandas X, C, L e P, que indicam relações lineares, diretas e mais fortes em frequências menores (Gonçalves, 2007). Nesse âmbito, pode-se citar os estudos realizados por Santos *et al.* (2003), Gama *et al.* (2005) e Gama *et al.* (2007).

Nos trabalhos de estimativa de parâmetros biofísicos a partir de dados ópticos, comumente utilizam-se dados de cada banda do sensor aliados a razões entre elas, além de índices de vegetação. Vários trabalhos têm sido conduzidos nessa área, a exemplo dos efetuados por Jakakubauskas e Price (1997), Xavier (1998) e Watzlawick *et al.* (2009).

Apesar dos referidos estudos, o entendimento da dinâmica de interação do sinal de radar e sensores ópticos com a estrutura complexa da vegetação ainda é incipiente. Nesse sentido, tornam-se necessárias pesquisas que busquem relacionar as informações registradas por esses sensores com a informação estrutural da vegetação.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi desenvolver modelos de regressão multivariada que estimem parâmetros biofísicos em áreas de plantios de eucalipto a partir de imagens dos sensores AVNIR-2, PRISM e PALSAR, a bordo do satélite ALOS. Os parâmetros estimados foram a idade, as alturas dominante e média, o diâmetro à altura do peito (DAP), a área basal, o número de fustes, o volume e a biomassa.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo pertence à empresa Celulose Nipo Brasileira S/A (CENIBRA) e engloba parte dos municípios mineiros de Belo Oriente e Ipaba, onde foram lançadas parcelas amostrais em áreas de produção de eucalipto para fabricação de celulose (Figura 1).

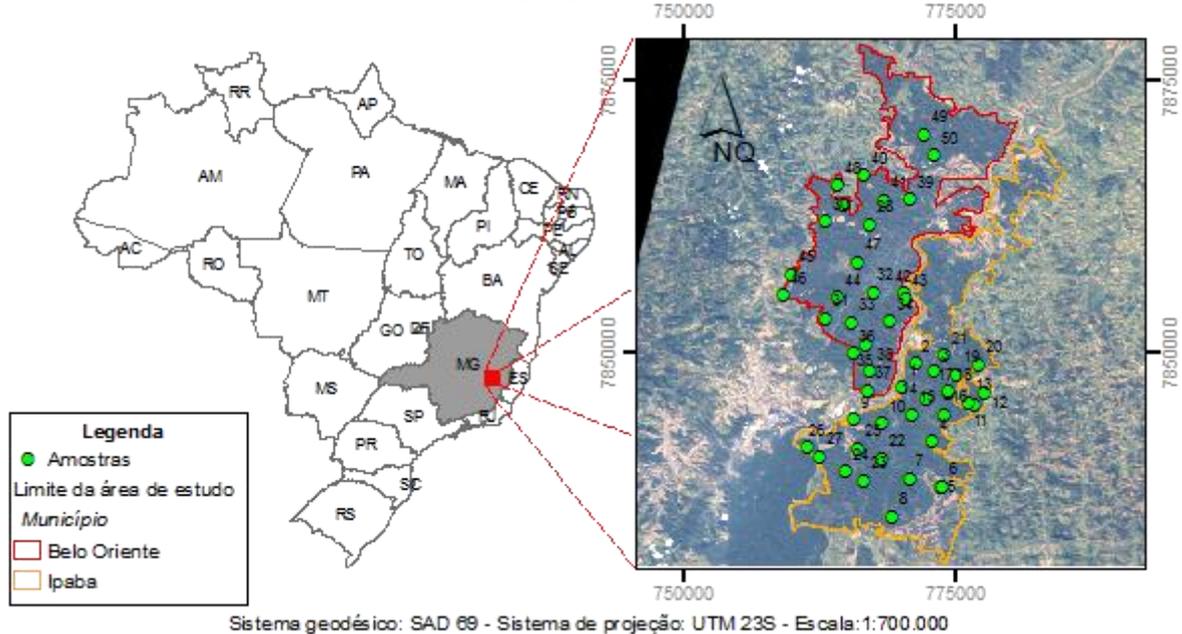


Figura 1: Área de estudo e localização das amostras inventariadas.

2.2. Materiais

O inventário florestal foi realizado pela empresa CENIBRA, no período de 25 de fevereiro a 5 de setembro de 2009, no qual foram realizadas medidas dos parâmetros idade, alturas dominante e média, DAP, área basal, número de fustes e estimados o volume e biomassa por meio de equações alométricas.

Além dos dados de inventário, utilizaram-se imagens dos sensores AVNIR-2, PRISM e PALSAR, a bordo do satélite ALOS. O imageamento pelo sensor AVNIR-2 foi realizado no dia 27 de maio de 2009; pelo PRISM, no dia 12 de julho de 2009; pelo PALSAR com quatro polarizações no dia 2 de maio de 2009 e com duas polarizações no dia 7 de agosto de 2009.

O AVNIR-2 é um sensor óptico com quatro bandas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo) e resolução espacial de 10 metros. O PRISM é um sensor capaz de gerar pares estereoscópicos que opera na faixa do espectro visível, com uma banda pancromática e resolução espacial de 2,5 metros. O PALSAR é um radar de abertura sintética (SAR) que opera na banda L, com resolução espacial que varia de 10 a 100 metros. O modo FBD (*Fine Beam Dual*) é capaz de imagear nas polarizações HH+HV ou VV+VH e o modo PLR (*Polarimetric*), nas polarizações HH+HV+VV+VH (IBGE, 2010).

2.3. Métodos

De modo simplificado, as etapas do trabalho são ilustradas na Figura 2.



Figura 2: Fluxograma das etapas do trabalho.

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas 50 amostras (Figura 1), com área de cerca de 300m² cada, selecionadas de modo a evitar a presença de nuvens e de abranger áreas imageadas pelos sensores AVNIR-2, PRISM e PALSAR.

As variáveis independentes empregadas para estimar os parâmetros biofísicos foram os atributos radar/ópticos.

Segundo Gonçalves (2007), as características polarimétricas de um determinado alvo podem ser descritas por uma série de atributos extraídos da matriz de espalhamento complexa (amplitude e fase). No caso específico das imagens PALSAR, essa matriz foi obtida para cada elemento de resolução. Neste estudo foram avaliados somente atributos baseados nas medidas de potência do radar (atributos incoerentes), descritos a seguir: coeficiente de retroespalhamento nas quatro polarizações (σ_{HH}^0 , σ_{HV}^0 , σ_{VH}^0 e σ_{VV}^0), razões de polarização paralela (R_P) e cruzada (R_C), descritos em Henderson e Lewis (1998); a potência total (P_T), apresentada por Boerner *et al.* (1991); e os índices de biomassa (BMI), de estrutura do dossel (CSI) e de espalhamento volumétrico (VSI), desenvolvidos por Pope *et al.* (1994).

As variáveis AVNIR-2 utilizadas foram o valor numérico de cada banda do sensor aliado aos índices de vegetação R (Índice de Vegetação da Razão Simples), NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) e SAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo). As variáveis PRISM usadas foram os valores numéricos da visada nadir (70 km) + visada simultânea para trás (35 km) e da visada nadir (35x35 km).

No ajuste dos modelos foram utilizados os dados referentes aos parâmetros biofísicos, sendo o conjunto de variáveis explicativas os valores médios de cada atributo recuperado sobre cada observação. A extração dos valores numéricos (VN) foi realizada com o auxílio de uma máscara desenvolvida no *software* ArcGIS 9.3, construída a partir das coordenadas geodésicas dos conglomerados. Essa máscara foi sobreposta às imagens e os valores correspondentes recuperados e organizados em planilha eletrônica.

De posse dos VN's, estes foram relacionados com os dados inventariados em cada amostra, obtendo, assim, o coeficiente de correlação entre cada atributo e variável biofísica. Semelhante ao descrito por Gama (2007), em face do elevado número de variáveis originadas do inventário florestal e do processamento das imagens (Tabelas 1, 2, 3 e 4), fez-se necessário o emprego da técnica Stepwise de estatística multivariada para definição das variáveis mais relevantes em relação aos dados de inventário de campo.

Tabela 1: Variáveis biofísicas dependentes.

Variável	Descrição
Idade	Idade, em anos
AD	Altura Dominante, em metros
AM	Altura Média, em metros
DAP	DAP, em centímetros
AB	Área Basal, em metros quadrados por hectare
Fustes	Número de fustes por hectare
Volume	Volume, em metros cúbicos
Biomassa	Biomassa em toneladas por hectare

Tabela 2: Variáveis independentes AVNIR-2

Variável	Descrição
AV1	Banda1 (Azul)
AV2	Banda2 (Verde)
AV3	Banda3 (Vermelho)
AV4	Banda4 (Infravermelho Próximo)
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado para o Solo
R	Índice de vegetação da Razão Simples

Tabela 3: Variáveis independentes PRISM.

Variável	Descrição
PUW	Visada nadir (70 km) + visada simultânea para trás (35 km)
PUB	Visada nadir (35x35 km)

Tabela 4: Variáveis independentes PALSAR.

Variável	Descrição
P41(HH)	Retroespalhamento, banda1, modo PLR
P42(HV)	Retroespalhamento, banda2, modo PLR
P43(VV)	Retroespalhamento, banda3, modo PLR
P44(VH)	Retroespalhamento, banda4, modo PLR
P21(HH)	Retroespalhamento, banda1, modo FBD
P22(HV)	Retroespalhamento, banda2, modo FBD
Rp4	Razão paralela, modo PLR
Rc4	Razão cruzada, modo PLR
Pt4	Potência total, modo PLR
BMI	Índice de Biomassa
CSI	Índice de Estrutura do Dossel
VSI	Índice de Espalhamento Volumétrico
Rc2	Razão paralela, modo FBD
Pt2	Razão cruzada, modo FBD

O procedimento Stepwise é uma técnica para a seleção da melhor equação de regressão, permitindo determinar quais as variáveis independentes serão incluídas. As variáveis independentes são adicionadas no modelo uma a uma, o que permite reexaminar, passo a passo, a equação selecionada nas etapas anteriores. Com isso, a variável selecionada num passo anterior poderá ser eliminada num passo seguinte. A cada passo testa-se a possibilidade de excluir do modelo a variável cuja contribuição parcial não foi considerada significativa.

Para se avaliar o potencial dos dados ópticos e de radar, bem como os produtos que estimam melhor as variáveis biofísicas, empregou-se o método estatístico de análise de regressão e ajustaram-se modelos de primeira ordem para a predição dos parâmetros. Para comparar os resultados dos dados de campo com informações estimadas pela regressão foram utilizados os coeficientes de correlação (R) e de determinação (R^2).

3. Resultados e Discussão

A partir da análise das matrizes de correlação do conjunto de dados (Tabelas 5 e 6), obtida por meio do *software* Statistica 8.0, notou-se que, de um modo geral, os atributos ópticos apresentaram valores de correlação com os parâmetros biofísicos superiores aos de radar, além de apresentarem menores dispersões, o que pode ter ocorrido devido à maior complexidade da interação do sinal do radar com a vegetação.

Tabela 5: Matriz de correlação entre as variáveis biofísicas e as variáveis independentes radar.

	P41(HH)	P42(HV)	P43(VV)	P44(VH)	P21(HH)	P22(HV)	Rp4	Rc4	Pt4	BMI	CSI	VSI	Rc2	Pt2
Idade	0,12	0,13	0,16	0,20	-0,19	-0,14	-0,06	-0,07	0,17	0,14	-0,07	0,11	-0,07	-0,18
Altura Dominante	0,21	0,16	0,13	0,31	-0,32	-0,31	-0,17	-0,16	0,26	0,21	-0,18	0,17	-0,16	-0,34
Altura Média	0,20	0,04	0,06	0,26	-0,40	-0,37	-0,18	-0,19	0,21	0,18	-0,19	0,07	-0,19	-0,42
DAP Médio	0,26	0,08	0,15	0,33	-0,39	-0,28	-0,24	-0,27	0,28	0,25	-0,24	0,05	-0,27	-0,37
Área Basal	0,17	0,04	0,10	0,27	-0,43	-0,29	-0,16	-0,18	0,21	0,17	-0,16	0,11	-0,18	-0,40
Fustes	-0,20	-0,10	-0,11	-0,13	-0,11	-0,04	0,20	0,20	-0,17	-0,19	0,19	0,13	0,20	-0,09
Volume	0,21	0,06	0,10	0,30	-0,40	-0,32	-0,20	-0,21	0,24	0,20	-0,20	0,10	-0,21	-0,39
Biomassa	0,21	0,07	0,11	0,30	-0,39	-0,31	-0,19	-0,21	0,25	0,21	-0,20	0,10	-0,21	-0,38

Tabela 6: Matriz de correlação entre as variáveis biofísicas e as variáveis independentes ópticas.

	AV1	AV2	AV3	AV4	PUB	PUW	R	NDVI	SAVI
Idade	0,64	0,27	0,19	-0,21	0,11	0,32	-0,30	-0,30	-0,30
Altura Dominante	0,36	0,24	0,17	-0,02	0,03	0,15	-0,10	-0,09	-0,09
Altura Média	0,30	0,19	0,10	0,02	-0,03	0,33	-0,03	-0,02	-0,02
DAP Médio	0,41	0,35	0,14	0,20	0,05	0,31	0,15	0,15	0,15
Área Basal	0,45	0,46	0,23	0,34	0,09	0,21	0,26	0,25	0,25
Fustes	0,12	0,26	0,20	0,30	0,15	-0,16	0,22	0,19	0,19
Volume	0,44	0,40	0,22	0,24	0,06	0,24	0,16	0,15	0,15
Biomassa	0,48	0,40	0,22	0,20	0,06	0,26	0,11	0,11	0,11

Conforme mencionado anteriormente, devido ao grande número de variáveis envolvidas na regressão, fez-se necessário o emprego da técnica Stepwise para seleção das variáveis mais significativas em cada modelo. Dessa forma, na Tabela 7, são apresentadas as equações de regressão ajustadas para cada variável biofísica.

Tabela 7: Modelos de regressão ajustados após a seleção das variáveis mais significativas.

	Modelo de regressão ajustado
Idade	$Y_{Idade} = -23,84 + 0,87.X_{AV1} - 1,03.X_{AV4} + 0,85.X_{SAVI} - 0,21.X_{P22(HV)}$
Altura Dominante	$Y_{AD} = -3,47 + 0,49.X_{AV1} - 0,34.X_{Pt2} + 0,42.X_{P44(VH)} - 0,23.X_{PUB} - 0,21.X_{P43(vv)} - 0,18.X_{AV3}$
Altura Média	$Y_{AM} = 7,54 - 0,46.X_{Pt2} + 0,33.X_{PUW} + 0,51.X_{P44(VH)} - 0,22.X_{PUB} - 0,22.X_{P42(HV)} + 0,32.X_{AV1} + 4,06.X_{NDVI} - 3,87.X_R$
DAP	$Y_{DAP} = 2,78 + 0,43.X_{AV1} - 0,46.X_{P21(HH)} + 0,41.X_{NDVI} - 0,33.X_{Rc2}$
Área Basal	$Y_{AB} = -4,84 + 0,18.X_{AV2} - 0,53.X_{P21(HH)} - 1,09.X_{AV3} + 0,55.X_{AV1} + 1,76.X_{NDVI} - 0,92.X_{Rc2} - 0,18.X_{PUB} + 0,28.X_{VSI} - 0,46.X_{P41(HH)} - 3,39.X_R + 2,19.X_{AV4} + 0,10.X_{PUW}$
Fustes	$Y_{Fustes} = 3218,39 + 5,09.X_{AV4} - 4,59.X_{SAVI} - 1,79.X_{AV3}$
Volume	$Y_{Volume} = -557,59 + 0,47.X_{AV1} - 0,44.X_{P21(HH)} + 0,38.X_{SAVI} - 0,26.X_{Rc2}$
Biomassa	$Y_{Biomassa} = -383,81 + 0,53.X_{AV1} - 0,43.X_{Pt2} + 3,25.X_{NDVI} + 0,49.X_{P44(VH)} - 2,89.X_R - 0,22.X_{PUW} - 0,17.X_{PUB} - 0,18.X_{P42(HV)}$

Abaixo, são apresentados os resultados dos modelos de regressão ajustados para cada variável biofísica estimada, onde se verifica uma boa linearidade do modelo final, além da comparação entre o resultado do modelo ajustado e os dados do inventário florestal (Figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10).

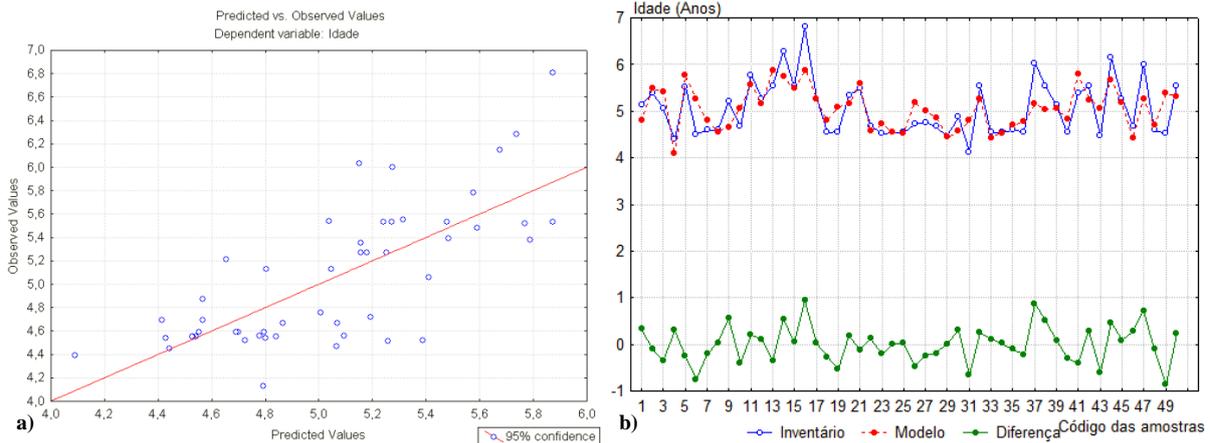


Figura 3: Idade. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

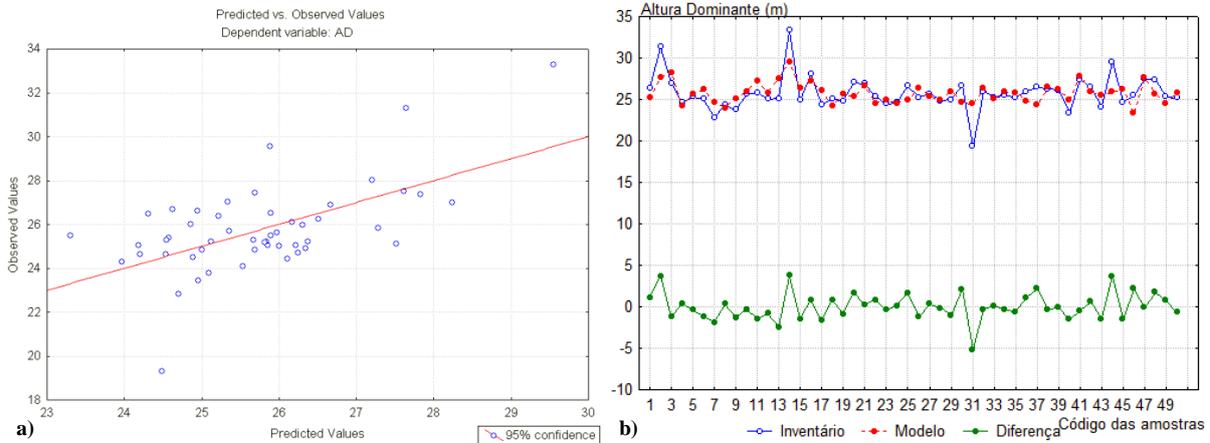


Figura 4: Altura dominante. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

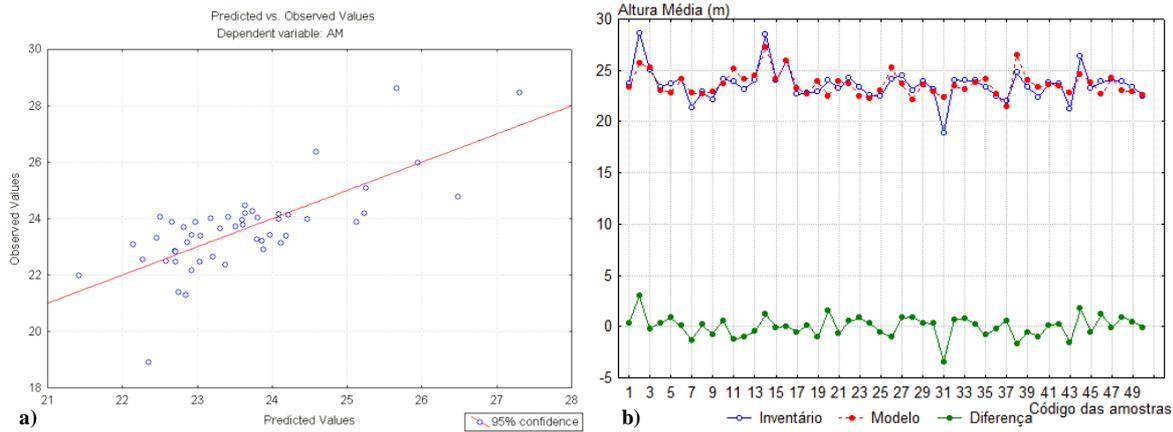


Figura 5: Altura média. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

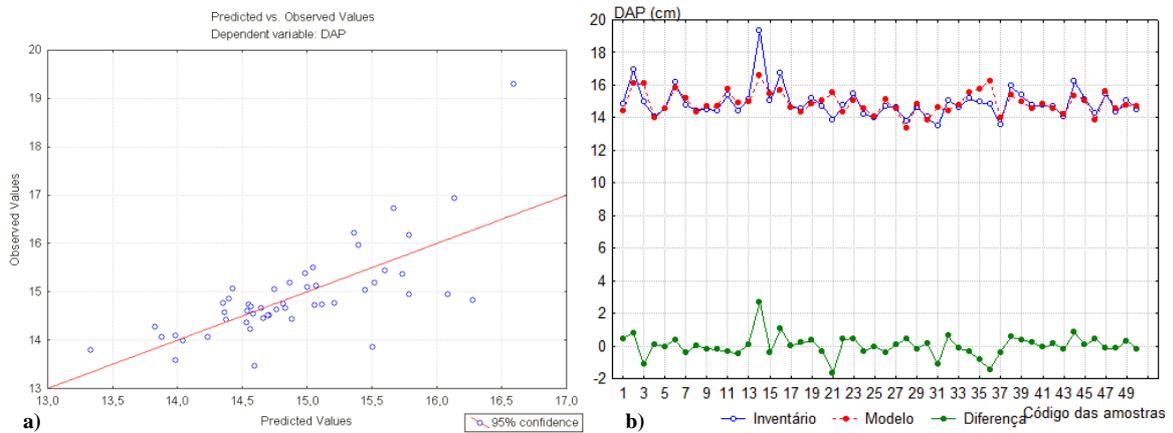


Figura 6: DAP. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

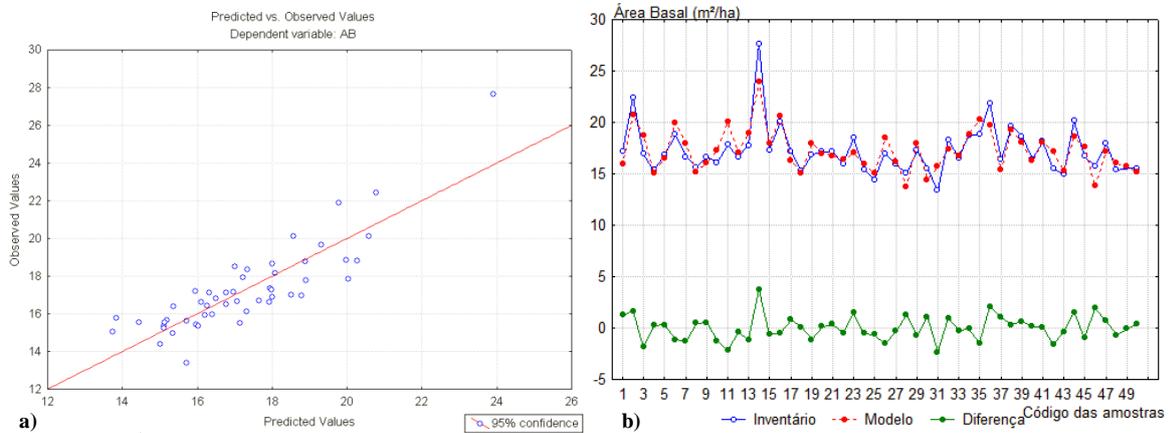


Figura 7: Área basal. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

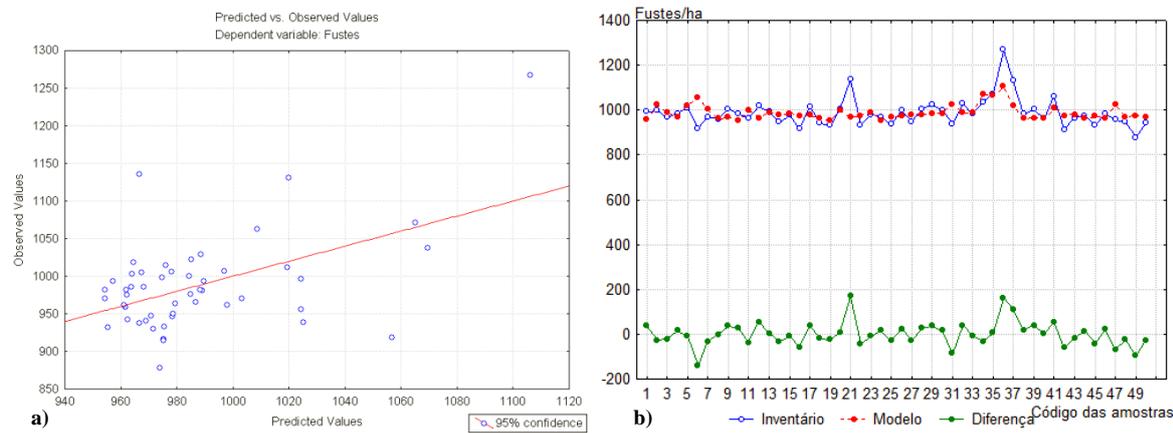


Figura 8: Fustes. a) Modelo de regressão ajustado; b) Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

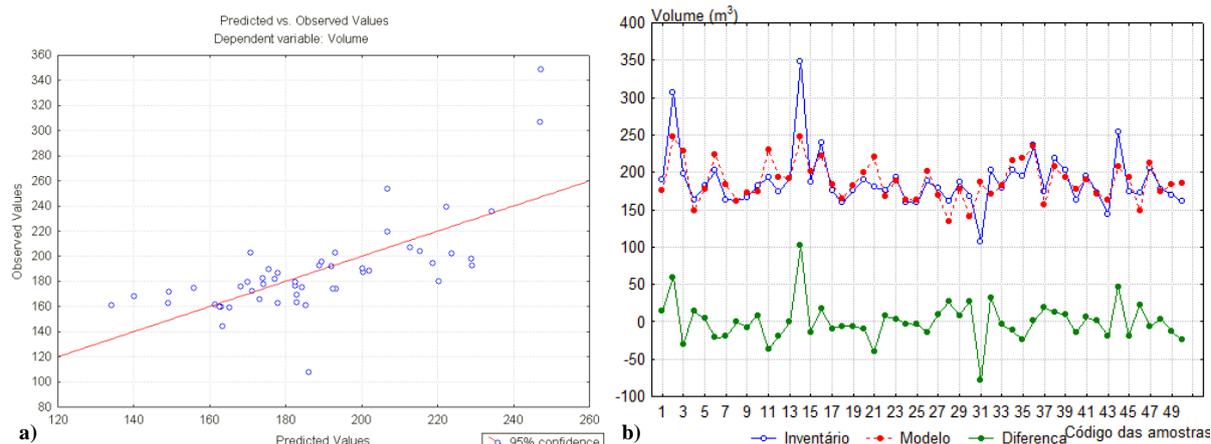


Figura 9: Volume. **a)** Modelo de regressão ajustado; **b)** Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

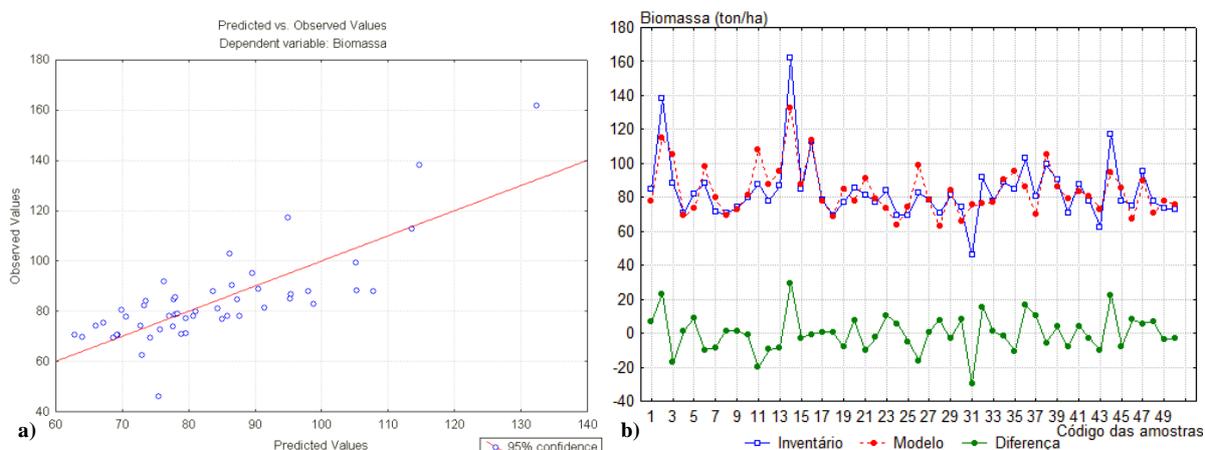


Figura 10: Biomassa. **a)** Modelo de regressão ajustado; **b)** Comparação entre o modelo e o inventário florestal.

Na Tabela 8, é possível verificar os coeficientes de correlação e determinação das variáveis em estudo para cada modelo ajustado, além das diferenças relativas mínima ($d_{MÍN}$) e máxima ($d_{MÁX}$) entre os valores observados e os preditos nas cinquenta amostras.

Tabela 8: Coeficientes de correlação e determinação dos modelos e diferenças relativas mínima e máxima.

	Idade	Altura Dominante	Altura Média	DAP	Área Basal	Fustes	Volume	Biomassa
R (%)	74,18	59,78	74,61	71,36	85,73	50,93	70,31	79,42
R² (%)	55,03	35,74	55,67	50,92	73,49	25,94	49,44	63,08
d_{MÍN}	0,13	0,27	0,07	0,07	0,47	0,10	0,05	0,59
d_{MÁX}	13,77	26,89	18,20	14,02	13,57	14,89	29,13	18,21

Os resultados obtidos demonstraram que os parâmetros oriundos dos sensores PALSAR, AVNIR-2 e PRISM são, de um modo geral, bem correlacionados com os parâmetros biofísicos aqui estimados, corroborando com os resultados alcançados em estudos semelhantes, *e.g.*, Xavier (1998), Gama (2007), Gonçalves (2007).

Os coeficientes de correlação após a seleção das melhores variáveis e ajuste dos modelos oscilaram entre 50,93% (Fustes) e 85,73% (Área Basal). Os erros relativos mínimo e máximo obtidos na estimativa dos parâmetros dendrométricos das cinquenta amostras foram, respectivamente, de 0,05% e 29,13%, ambos ocorrendo para a variável Volume.

Algumas parcelas comprometeram a melhora do ajuste dos modelos. A amostra 14 apresentou-se como parcela com o resíduo mais alto em metade dos casos, em seguida, a amostra 31, sendo por duas vezes a parcela com maior resíduo. Caso essas e outras parcelas com resíduos destoantes fossem removidas o ajuste dos modelos de regressão poderiam ser aprimorados.

4. Conclusões

O presente trabalho objetivou avaliar a utilização de imagens ALOS para a estimativa de variáveis biofísicas em áreas de plantio de eucalipto. Os resultados obtidos para os modelos de predição dos parâmetros biofísicos foram, de um modo geral, satisfatórios, evidenciando o grande potencial do uso de sensores radar ou ópticos para esse fim.

Baseado na abordagem metodológica aqui empregada, pode-se concluir que as respostas da vegetação aos sensores radar e ópticos foram distintas. Desse modo, tornam-se necessários estudos que investiguem essa questão com maior profundidade, analisando se os modelos ajustados somente em função dos atributos SAR ou ópticos fornecerão resultados superiores aos obtidos pela análise de tais atributos realizada em conjunto.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de iniciação científica e financiamento deste projeto.

À empresa Celulose Nipo Brasileira S/A – CENIBRA, por disponibilizar os dados do inventário florestal e pelo auxílio no decorrer do trabalho.

Referências Bibliográficas

- Boerner, W. M.; Yan, W. L.; Xi, A. Q.; Yamaguchi, Y. On the basic principles of radar polarimetry: the target characteristic polarization state theory of Kennaugh, Huynen's polarization fork concept, and its extension to the partially polarized case. **Proceedings of the IEEE**, v. 79, n. 10, p. 1538-1550, 1991.
- Gama, F. F.; Santos, J. R.; Freitas, C. C.; Mura, J. C. Aplicação de dados polarimétricos de radar aerotransportado (banda P) para estimativa de parâmetros estruturais de florestas tropicais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4413-4420.
- Gama, F. F. Estudo da interferometria e polarimetria SAR em povoamentos florestais de Eucalyptus sp. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. 2007.
- Gama, F. F.; Santos, J. R.; Mura, J. C.; Freitas, C. C. Utilização de dados polarimétricos e interferométricos SAR para estimativa de biomassa de povoamentos de Eucalyptus. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 4857-4864.
- Gonçalves, F. G. Avaliação de dados SAR polarimétricos para estimativa volumétrica de florestas tropicais. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. 2007.
- Henderson, F. M.; Lewis, A. J. **Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radars**. 3.ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1998. 866 p.
- IBGE. **Imagens do Satélite ALOS**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/alos/>>. Acesso em: 09 de novembro de 2010.
- Jakubauskas, M.E.; Price, K.P. Empirical relationship between structural and spectral factors of Yellowstone lodgepole pine forests. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Bethesda, v.63, n.12, p.1375-1381, 1997.
- Pope, K. O. Rey-Benayas J.M., Paris J.F. 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.; Freitas, C.C.; Araujo, L.S.; Dutra, L.V.; Mura J.C.; Gama, F.F.; Soler L.S.; Sant'Anna S.J.S. 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.
- Watzlawick, L. F.; Kirchner, F. F.; Sanquetta, C. R. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.19, n.2, p.169-181, abr.-jun., 2009.
- Xavier, A.C. Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de eucaliptos a partir de dados Landsat-TM. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos. 1998.