

Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp.  
com imagens de satélite de alta resolução espacialWood volume estimates for *Eucalyptus* sp.  
with satellite images of high spatial resolutionFabrício Lopes de Macedo<sup>1</sup>, Adélia Maria de Oliveira Sousa<sup>2</sup>, Ana Cristina Gonçalves<sup>3</sup>,  
Hélio Ricardo Silva<sup>4</sup> e Ricardo Antonio Ferreira Rodrigues<sup>5</sup>

---

**Resumo**

A estimativa do volume é particularmente relevante em povoamentos cuja principal produção é a madeira. O objetivo deste estudo foi desenvolver funções para estimar o volume total e comercial com e sem casca, com auxílio de imagens de alta resolução espacial, para povoamentos de eucalipto. As funções alométricas foram ajustadas a partir de dois conjuntos de dados; o volume estimado a partir dos dados das parcelas de inventário e o valor médio de índices de vegetação de uma imagem de alta resolução espacial do satélite Pléiades. As funções alométricas com melhor desempenho para os volumes total e comercial com e sem casca são as que apresentam o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI) como variável independente, com um coeficiente de determinação ajustado entre 69 e 74%. Para povoamentos em que o fechamento do copado ainda não ocorreu, o índice de vegetação SAVI originou funções com melhor performance em comparação com o NDVI. Estas funções podem ser usadas quer à escala local quer regional, em regiões com clima e características locais semelhantes, para as mesmas espécies de eucalipto.

**Palavras-chave:** Funções alométricas, índices de vegetação, satélite Pléiades.

**Abstract**

Volume estimates are particularly relevant in stands whose main production is wood. The objective of this study was to develop functions to estimate the total trade volume and with and without shell, with the help of high-resolution images for Eucalyptus. The allometric functions were adjusted from two sets of data: the volume estimated from the data of inventory plots and the mean value of vegetation index of a high spatial resolution image of the Pleiades satellite. The allometric functions with better performance for total and commercial volumes with and without bark are the ones with the Adjusted Vegetation Index for the Soil (SAVI) as an independent variable, with the adjusted coefficient of determination varying between 69 and 74%. These functions can be used not only at local and regional level, but also in regions with similar climate and local conditions and the same species of eucalyptus.

**Keywords:** Allometric functions, vegetation indices, satellite Pleiades.

---

**INTRODUÇÃO**

A tomada de decisão para uma gestão sustentável das florestas necessita de uma contínua fonte de informações com alta qualidade sobre os recursos florestais (AERTSEN et al., 2010). As tradicionais medições de campo em propriedades florestais, normalmente são realizadas com auxílio de

---

<sup>1</sup>Doutor em Agronomia. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro / Centro de Investigação e de Tecnologias Agroambientais e Biológicas. Quinta dos Prados – Vila Nova de Baixo - 5001801 – Vila Real – Portugal. E-mail: [fabriciolmacedo@hotmail.com](mailto:fabriciolmacedo@hotmail.com)

<sup>2</sup>Professora Auxiliar no Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora / Escola de Ciências e Tecnologia / ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas. Apartado 94, 7002 – 554 - Évora, Portugal. E-mail: [asousa@uevora.pt](mailto:asousa@uevora.pt)

<sup>3</sup>Professora Auxiliar com Agregação no Departamento de Engenharia Rural. Universidade de Évora / Escola de Ciências e Tecnologia / ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas. Apartado 94, 7002 – 554 - Évora, Portugal. E-mail: [acag@uevora.pt](mailto:acag@uevora.pt)

<sup>4</sup>Professor Assistente Doutor do Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural. UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / FEI - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Av. Brasil, 56 - Faculdade de Agronomia – Centro - 15385000 - Ilha Solteira, SP, Brasil. E-mail: [hrrsilva@agr.feis.unesp.br](mailto:hrrsilva@agr.feis.unesp.br)

<sup>5</sup>Professor Livre Docente do Departamento de Fitossanidade e Engenharia Rural. UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / FEI - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Av. Brasil, 56 - Faculdade de Agronomia – Centro - 15385000 - Ilha Solteira, SP, Brasil. E-mail: [ricardo@agr.feis.unesp.br](mailto:ricardo@agr.feis.unesp.br)

equipamentos de mão (MOHAMMADI et al., 2011). No entanto, essas medições são caras, requerem tempo e um intenso trabalho, além de serem complicadas de serem realizadas, principalmente em regiões com difícil acesso, como em montanhas e em florestas densas (BUCKLEY et al., 1999). Outras limitações decorrem das alterações das áreas florestais, que exigem repetidas avaliações em intervalos curtos de tempo (MOHAMMADI et al., 2010).

Para Sanquetta e Balbinot (2004), o processo de determinação do volume de madeira, seja por métodos diretos e/ou indiretos tradicionais, é normalmente dispendioso e lento, sendo extremamente dependente de mão-de-obra qualificada para os trabalhos de campo. A utilização do método direto, consiste nas derrubadas das árvores, e na mensuração de seus componentes; já com o uso do método indireto são empregadas equações alométricas ou ainda técnicas de sensoriamento remoto, para realização das suas estimativas.

De acordo com Watzlawick et al. (2009), as implicações do papel das florestas no ciclo do carbono geraram uma demanda pelo desenvolvimento de metodologias não destrutivas para a quantificação da biomassa e do volume de madeira, elementos essenciais no processo de modelagem dos ciclos biogeoquímicos. Muitos trabalhos com intuito de estimar os parâmetros florestais nas florestas boreais foram realizados desde a década de 1970, utilizando imagens de satélite, como as do Landsat TM e SPOT (HÄME et al., 1996; NILSSON, 1997; KATILA; TOMPPU, 2001). McRoberts e Tomppo (2007) ressaltam alguns pontos a favor da utilização de dados de sensoriamento remoto: dados espaciais adquiridos com menor custo em comparação às fotografias aéreas; possibilidade de obtenção de estimativas para grandes áreas com uma adequada precisão; estimativas para pequenas áreas, quando não existem dados de campo disponíveis; produção de mapas temáticos, que podem ser utilizados em estudos ecológicos, na produção madeireira e alimentação.

Rosenqvist et al. (2003) afirmam que o fundamento essencial para a obtenção de estimativas de estruturas vegetais por meio do sensoriamento remoto, consiste na associação de dados de radiação/refletância, oriundos das imagens de satélite com dados aferidos no campo. A principal abordagem desse tipo de estudo, consiste na combinação de dados oriundos das imagens de satélite com dados de campo, ponderados a partir de parcelas para estimação de variáveis florestais para cada pixel presente na imagem (MÄKELÄ; PEKKARINEN, 2004). Segundo Katila e Tomppo (2001), após as estimativas em nível de pixel, as estimativas para os povoamentos florestais podem ser obtidas através da média de pixels dentro de uma determinada parcela de estudo.

De acordo com Peterson e Ruuning (1989), estimações de parâmetros biofísicos da vegetação, como por exemplo, o volume de madeira representam uma importante utilização do sensoriamento remoto. Com base nessa premissa, podem ser empregados dados oriundos de diversos sensores de média resolução espacial, como o sensor TM/Landsat (FAZAKAS et al. 1999; KRANKINA et al. 2004; TURNER et al. 2004) e de muito alta resolução espacial, como o satélite Quickbird e WorldView (OZDEMIR, 2008).

As associações de dados de campo com imagens de satélite, podem ser realizadas com auxílio de índices de vegetação. Índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais, gerados a partir de uma imagem monocromática por meio da combinação de determinadas canais ou bandas espectrais. O principal objetivo da utilização de combinação de bandas consiste em destacar certas características dos alvos propiciando vincular informações espectrais aos parâmetros florestais, por meio do desenvolvimento de analogias diretas (BERGER et al., 2014; COHEN et al., 2001; POWELL et al., 2010).

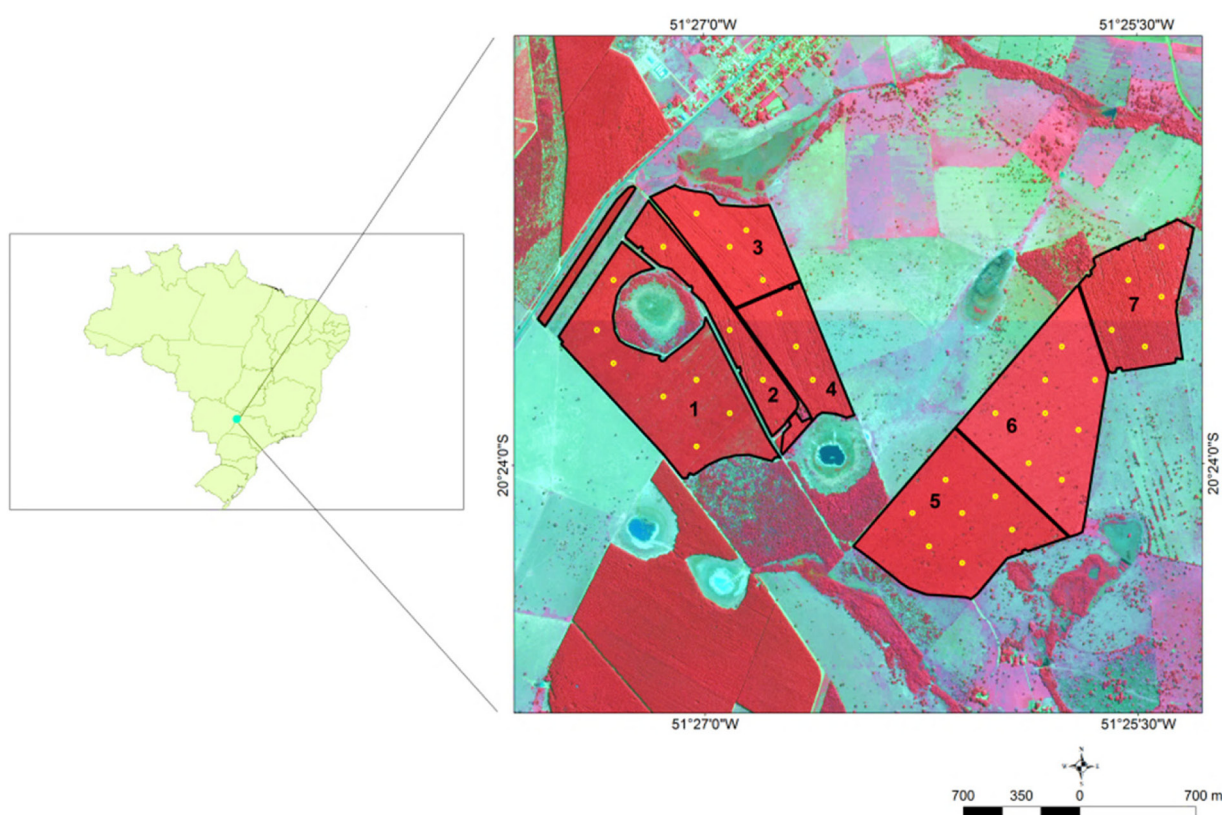
Jensen (2009) e Ponzoni e Shimabukuro (2009) apresentam diversos índices de vegetação, porém alguns merecem destaque como o Índice de Razão Simples (SR - Simple Ratio), o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI - Normalized Difference Vegetation Index), o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI - Soil Adjusted Vegetation Index), que, por meio da introdução de uma constante tem como finalidade minimizar o efeito do solo e o Índice de Vegetação Realçado (EVI - Enhanced Vegetation Index). Os índices de vegetação fundamentados em quocientes como o SR e NDVI, dentre outros, utilizam bandas espectrais na região do vermelho e do infravermelho próximo, em virtude do comportamento da vegetação destas bandas. Baseado no contexto acima descrito, este trabalho, teve como objetivo desenvolver funções alométricas para estimar o volume total e comercial, com e sem casca, cuja variável independente é um índice de vegetação, calculado com dados de sensores remotos de alta resolução espacial, para povoamentos de *Eucalyptus* sp.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

A área de estudo é denominada de Fazenda Dois Irmãos do Buriti, localizada próximo ao município de Selvíria, no estado do Mato Grosso do Sul (Figura 1) propriedade da empresa Eldorado Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Aw, com inverno seco e ameno e verão quente e chuvoso, com precipitações médias anuais de 1.370 mm, concentradas no período de outubro a março, a temperatura média anual é de 23,5°C e a umidade relativa do ar variando entre 70% e 80% (RODRIGUES et al., 2007). Na área de estudo os solos pertencem às classes Latossolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos. A altitude média no local é de 335 m (EMBRAPA, 1999). As tipologias florestais da região são compostas basicamente de Eucalipto e algumas manchas de Cerrado e Cerradão.

A área de estudo está dividida em 7 talhões, correspondentes a plantios de três espécies de eucalipto, em que foram instaladas 37 parcelas randomizadas: Talhão 1, 2, 4 e 7 com *Eucalyptus urophylla* plantados em outubro de 2011; Talhão 3 e 5 com *Eucalyptus urograndis* plantados em maio de 2011; Talhão 6 com *Eucalyptus grandis* plantado em maio 2011.



**Figura 1.** Localização das parcelas. Imagem em falsa cor (RGB-IVP, Vermelho, Verde).  
**Figure 1.** Location of the plots. False colour composite (RGB).

### Dados de satélite

Os dados de satélite utilizados tem origem na imagem ortorretificada do satélite Pléiades (27 de Julho de 2013) disponibilizada pela Engesat na forma denominada "Pan-sharpened" com 0,50 m de resolução espacial, com quatro bandas multiespectrais, Azul (A) (430-550 nm), Verde (500-620 nm), Vermelho (V) (590-710 nm) e Infravermelho próximo (IVP) (740-940 nm) (Figura 1).

### Estimativa do volume de madeira em áreas de eucalipto

O inventário florestal foi realizado com base no "Método de área fixa com parcelas circulares", em que as 37 parcelas medidas apresentavam formato circular com uma área de 400 m<sup>2</sup> e raio de 11,24 m. Foram realizadas medições de CAP (circunferência na altura do peito) e altura total das árvores (com hipsômetro). Foi usada a função de Schumacher e Hall (1933) para calcular os volumes total e comercial de madeira com e sem casca (eq. 1) em que  $v$  é o volume (m<sup>3</sup>);  $dap$  o diâmetro a

altura do peito (1,3 m de altura) (cm);  $h$  a altura total das árvores (m);  $TX$  - variável binária (se  $TX = 0$ , volume com casca e se  $TX = 1$ , volume sem casca);  $d$  o diâmetro superior comercial, com casca (cm);  $e$  equivale ao exponencial,  $\beta_0 \dots \beta_4$  equivale aos parâmetros dos modelos;  $\varepsilon$  é o erro aleatório).

$$v = \beta_0 \cdot dap^{\beta_1} \cdot h^{\beta_2} \cdot e^{\beta_3(TX \cdot dap)} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{dap}\right)^{1+\beta_4}\right] \cdot \varepsilon \quad (eq.1)$$

Queiroz et al. (2009), obtiveram resultados superiores para o crescimento e estabelecimento no campo para as espécies *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e o híbrido *Eucalyptus urograndis* sendo estas superior as espécies *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus saligna*, *pellita* e *Corymbia citriodora*.

### Determinação dos Índices de Vegetação

Quatro índices de vegetação (IV) foram calculados com base nas bandas individuais do satélite Pléiades, com auxílio do Spatial Analyst do ArcGIS (ESRI, 2010). A Razão Simples (SR) (JORDAN, 1969) ( $SR = IVP/V$ ); o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE et al., 1973) ( $NDVI = IVP - V / IVP + V$ ); o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI) (HUETE, 1988) ( $SAVI = ((IVP - V) / (IVP + V + 0,5)) \times (0,5 + 1)$ ), e o Enhanced Vegetation Index (EVI) (HUETE, et al., 1996; 1997) ( $EVI = 2,5 \times (IVP - V) / (IVP + 6 \times V - 7 \times A + 1)$ ). Todos combinaram informações de duas ou mais bandas espectrais para melhorar o sinal da vegetação, minimizando o efeito do solo e efeitos atmosféricos (JACKSON; HUETE, 1991). Os valores dos IV por parcela de inventário foram calculados como a média aritmética dos valores dos pixels presentes no interior de cada parcela.

### Desenvolvimento de modelos de regressão

A análise de correlação entre o volume total e comercial com e sem casca e os índices de vegetação foi efetuada com o teste de Spearman, dado que as variáveis não apresentavam distribuição normal, aferida pelo teste de normalidade de Shapiro Wilk (SHAPIRO et al., 1968), para um nível de significância de 95%. Os modelos de volume foram ajustados com técnicas de regressão linear, pelo método dos mínimos quadrados (eq.2, onde  $\beta_0$  é a constante,  $\beta_1$  o declive da reta,  $V$  o volume e  $IV$  é o índice de vegetação), como sugerido por vários autores (AUSTIN et al., 2003; DRAKE et al., 2002a; DRAKE et al., 2002b; POPESCU et al., 2003; RAUSTE; HÄME, 1994). A soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) foram usados para aferir as propriedades estatísticas dos modelos de acordo com o sugerido por SOUSA et al. (2015). A validação de modelos deve ser preferencialmente efetuada com um conjunto independente de dados. Quando tal não é possível Clutter (1983) e Myers (1986) sugerem a utilização dos resíduos PRESS, que são obtidos a partir de um processo iterativo em que o modelo é ajustado sucessivamente com todas as observações menos uma, o que garante a independência das observações usadas na validação e no ajustamento (PAULO et al., 2015). A soma dos quadrados dos resíduos PRESS (PRESSm, eq.3) e a soma dos valores absolutos dos resíduos estimados (APRESSm, eq.4), foram usadas como teste de validação. O modelo com melhor desempenho será selecionado com base naqueles que apresentarem os menores valores de SQR, PRESS e APRESS, e os maiores de  $R^2$  e  $R^2_{aj}$ . A heteroscedasticidade associada ao termo do erro dos modelos e a normalidade dos resíduos studentizados foram avaliadas, na forma gráfica, pela relação entre os resíduos studentizados e a estimativa da variável dependente; e dos gráficos de probabilidade normal e do teste de normalidade de Shapiro Wilk, para um nível de probabilidade de 99%. A análise estatística foi implementada no software estatístico R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2012), pacote STATS.

$$V = \beta_0 + \beta_1 \times IV \quad (eq.2)$$

$$PRESSm = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-1})^2 \quad (eq.3)$$

$$APRESSm = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_{i,-1}| \quad (eq.4)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análise de correlação

Foi gerada uma matriz de correlação com intuito de determinar o grau de associação entre variáveis. A matriz de correlação relacionou as variáveis dependentes volume total com casca (VTCC), volume total sem casca (VTSC), volume comercial com casca (VCCC), volume comercial sem casca (VCSC) e como variáveis independentes foram analisados as respostas espectrais das diferentes bandas e os índices de vegetação NDVI, SR, SAVI e EVI das imagens provenientes do satélite. De acordo com os resultados obtidos observou-se que as variáveis dependentes apresentam fortes correlações negativas com todas variáveis independentes (Tabela 1).

As altas correlações obtidas para os índices de vegetação analisados são justificadas devido principalmente por suas composições que utilizam essencialmente as bandas espectrais na região do espectro eletromagnético relacionada ao vermelho e ao infravermelho, respectivamente considerada como sendo uma região de forte absorção e de máxima refletância.

Os resultados obtidos no presente estudo são semelhantes aos obtidos por Watzlawick et al. (2009) que analisaram a estimativa de biomassa e carbono orgânico em plantações de *Araucaria angustifolia* com índices de vegetação do satélite Ikonos II.

BERRA et al. (2012) e SILVA (2014) que avaliaram a estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto e volume de madeira no cerrado com auxílio de imagens Landsat, porém os valores obtidos pelos autores diferem no sinal do presente trabalho. Duas hipóteses podem ter originado essa mudança de sinal. A primeira faz referência ao aumento do sombreamento das copas das árvores, que pode ter contribuído para essa relação. Esse resultado é semelhante ao obtido por Ardö (1992), que obteve elevada correlação negativa (-0,79) entre algumas bandas originais do satélite Landsat TM e o volume, para floresta de coníferas. Outro fato que pode ter acarretado diferenças no sinal correspondem ao fechamento do dossel florestal, visto que, de acordo com Spanner et al. (1990) correlações positivas são encontradas para áreas florestais com dosséis fechados e correlações negativas são encontradas para áreas com dosséis abertos. Como a área de estudo não estava totalmente fechada devido à idade do eucalipto, isso pode ter propiciado a mudança do sinal.

**Tabela 1.** Coeficientes de correlação entre os volumes de madeira e os índices de vegetação.

**Table 1.** Correlation coefficients between tree volume and the vegetation indices.

	VTCC	VTSC	VCCC	VCSC	NDVI	SR	SAVI	EVI
VTCC	1							
VTSC	1	1						
VCCC	0,985	0,985	1					
VCSC	0,989	0,989	0,999	1				
NDVI	-0,715	-0,715	-0,752	-0,743	1			
SR	-0,718	-0,718	-0,755	-0,746	0,998	1		
SAVI	-0,708	-0,708	-0,745	-0,736	0,999	0,998	1	
EVI	-0,600	-0,600	-0,642	-0,625	0,811	0,818	0,818	1

### Volumes de Madeira

Os modelos com o melhor desempenho foram os que apresentaram como variável independente o SAVI (M1). Os modelos M4, cuja variável independente foi o EVI, foram os que apresentam os piores resultados (Tabela 2). Pode-se ainda observar que os valores dos resíduos PRESSm e APRESm para VTCC, VTSC, VCCC e VCSC dos modelos M2 e M1 foram semelhantes. No entanto, os modelos M1 apresentam menores valores de SQR e maiores coeficientes de determinação, sendo assim selecionados como os melhores modelos. A análise dos resíduos studentizados não apresentou variações sistemáticas, os gráficos de probabilidade normal se aproximaram de uma linha reta (Figura 2) e normalidade dos resíduos não foi rejeitada pelo teste de Shapiro-Wilk. Analisando os resultados referentes aos volumes de madeira, o presente trabalho apresentou resultados semelhantes aos obtidos por Xavier (1998) e Berra (2013) em que o SAVI foi o índice selecionado em seu modelo para estimativa de volume de madeira em um plantio de *Eucalyptus* e *Pinus elliottii* respectivamente. Como não existia um fechamento completo das copas do eucalipto no presente estudo, havia a presença de solo, isso favoreceu os melhores resultados para o SAVI originando melhores perfor-

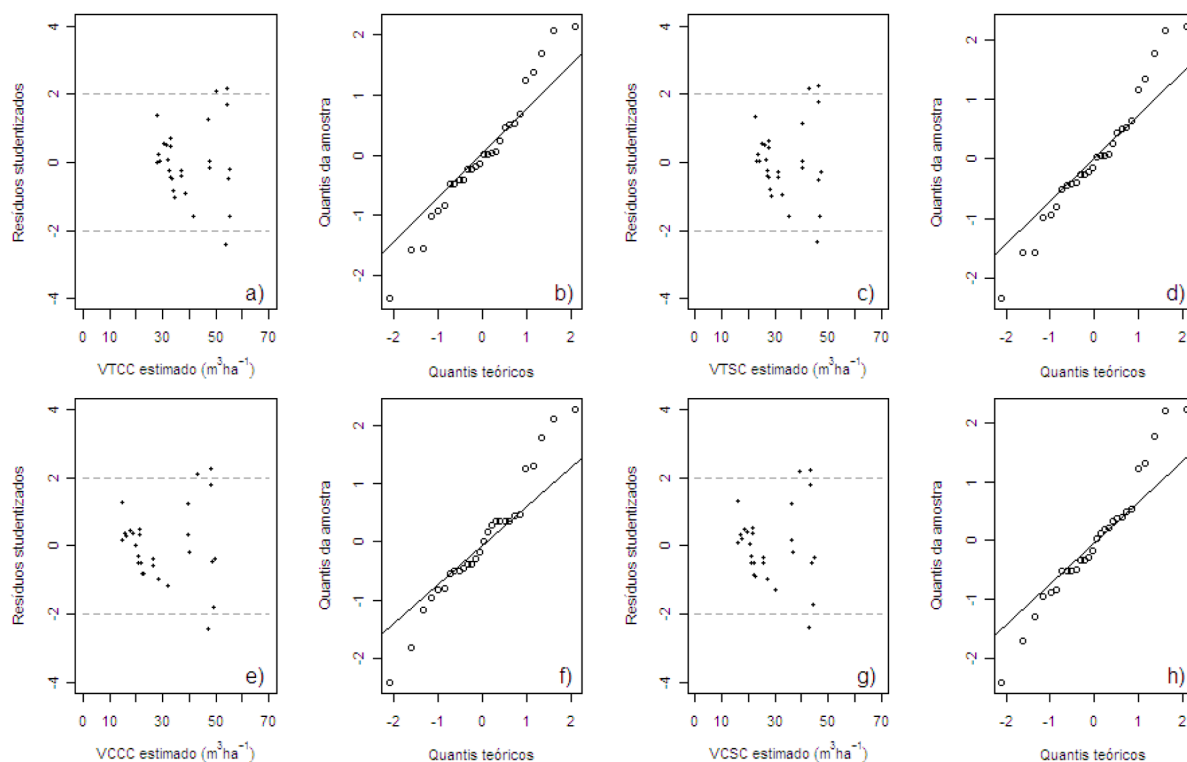
mances dos modelos. Segundo Robinove et al., (1981) e Huete et al., (1985) quando o fechamento do dossel florestal está incompleto, o sinal espectral mais forte é do brilho do solo ou sub-bosque.

Segundo vários autores (WANG et al., 2005; PONZONI; SHIMAKUBURO, 2009; ZANZARINI et al., 2013) um aumento na cobertura do solo (densidade da vegetação, volume ou biomassa fotossinteticamente ativa) pode não aumentar o valor do *NDVI*, devido à sua rápida saturação; neste caso, embora tivesse ocorrido aumento na densidade do dossel ou do volume de madeira, o índice torna-se insensível a este aumento.

**Tabela 2.** Propriedades estatísticas do modelo ajustado.

**Table 2.** Statistical properties of the fitted model.

Modelo	Equação	SQR	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>	PRESSm	APRESSm
<b>Volume Total Com Casca</b>						
M1	VTCC=-334,59+417,48×SAVI	1117,0	0,705	0,694	0,00060	0,01936
M2	VTCC=-502,66+418,25×NDVI	1128,5	0,702	0,691	0,00060	0,01945
M3	VTCC=-15,66+151,91×SR	1172,7	0,691	0,679	0,01731	0,55654
M4	VTCC=-317,44+81,22×EVI	1707,7	0,550	0,532	0,00065	0,02115
<b>Volume Total Sem Casca</b>						
M1	VTSC=-295,94+367,64×SAVI	886,1	0,702	0,691	0,02351	0,64561
M2	VTSC=-444,57+368,21×NDVI	896,0	0,699	0,687	0,02347	0,64868
M3	VTSC=-13,857+132,643×SR	930,5	0,688	0,676	0,02422	0,66380
M4	VTSC=-281,01-73,63×EVI	1345,5	0,548	0,531	0,02573	0,70042
<b>Volume Comercial Com Casca</b>						
M1	VCCC=-423,8+508,42×SAVI	1446,8	0,748	0,738	0,03093	0,78694
M2	VCCC=-636,44+509,08×NDVI	1470,4	0,744	0,734	0,03100	0,78940
M3	VCCC=-19,87+172,08×SR	1526,3	0,734	0,724	0,03318	0,81814
M4	VCCC=-409,53-126,22×EVI	2269,6	0,604	0,589	0,03721	0,86070
<b>Volume Comercial Sem Casca</b>						
M1	VCSC=-344,92+417,89×SAVI	1045,8	0,731	0,721	0,03344	0,80485
M2	VCSC=-518,04+418,47×NDVI	1060,7	0,727	0,717	0,03343	0,80784
M3	VCSC=-16,165+144,10×SR	1100,7	0,717	0,706	0,03525	0,83114
M4	VCSC=-331,32-97,86×EVI	1618,1	0,584	0,568	0,03871	0,87279



**Figura 2.** Resíduos studentizados (a, c, e, g) e gráfico de probabilidade normal (b, d, f, h) das funções alométricas VTCC, VTSC, VCCC, VCSC, com SAVI como variável independente.

**Figure 2.** Studentized residuals (a, c, e, g) and normal probability plot (b, d, f, h) of allometric functions VTCC, VTSC, VCCC, VCSC, whit SAVI as an independent variable.

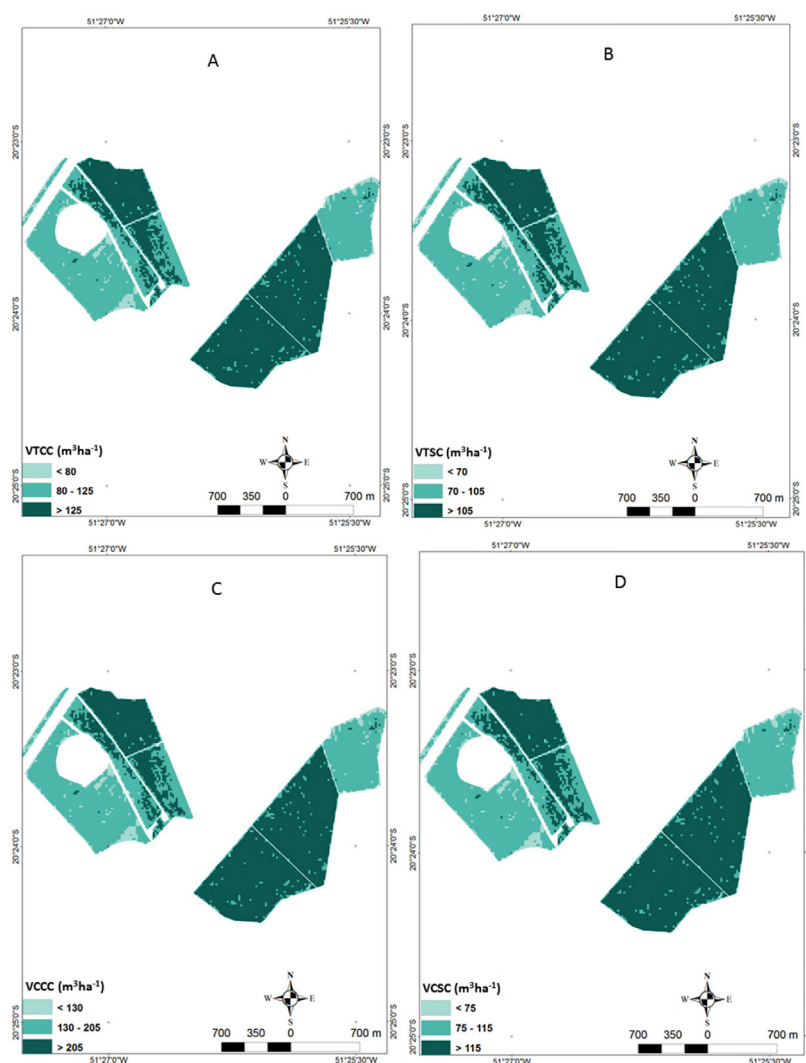


### Caso de aplicação da função desenvolvida

Com o intuito de realizar o mapeamento dos volumes de madeira, dividiu-se a área de estudo numa quadrícula de 20 x 20 m, correspondendo à área das parcelas (400 m<sup>2</sup>). Foi calculado o valor médio do SAVI (média aritmética de todos os pixels de cada quadrícula da grelha), e os volumes de madeira foram obtidos com a aplicação do modelo M1.

Com base nas equações desenvolvidas, foram gerados quatro mapas correspondendo ao Volume Total com Casca (VTCC), Volume Total sem Casca (VTSC), Volume Comercial com Casca (VCCC), Volume Comercial sem Casca (VCSC) (Figura 3). Observou-se uma variabilidade considerável de desenvolvimento entre talhões. A real diferença de idades entre os talhões 1, 2, 4 e 7, plantados 5 meses mais tarde que os talhões 3, 5 e 6 apresentou certa variação no crescimento. No primeiro grupo o volume obtido foi menor, possivelmente devido às diferenças de idade. Por outro lado, como as árvores do primeiro grupo estão numa fase inicial de crescimento existe um maior investimento no desenvolvimento do sistema radicular e crescimento em altura, o crescimento em diâmetro ocorre com os fotoassimilados remanescentes. Foi possível observar ainda que houve uma grande variação de crescimento dentro de uma mesma espécie (*Eucalyptus urophylla*) com relação ao volume de madeira para esse primeiro grupo, as plantas não apresentaram inicialmente um padrão homogêneo de crescimento, no entanto espera-se que esse efeito de desuniforme vem a desaparecer com o total desenvolvimento da espécie.

O maior tempo de estabelecimento do grupo 2 possibilitou que as plantas pudessem ter um maior desenvolvimento e que proporcionou consequentemente um maior volume de madeira para esse grupo em comparação com o primeiro.



**Figura 3.** Mapas gerados com o modelo M1, a) Volume Total com Casca, b) Volume Total sem Casca, c) Volume Comercial com Casca e d) Volume Comercial sem Casca.

**Figure 3.** Maps generated with the model M1, a) Total volume with bark, b) Total volume without bark, c) Trade volume with bark, d) Trade volume without bark.

## CONCLUSÕES

Por meio da análise estatística foi possível verificar a existência de uma alta relação entre as variáveis dependentes com as variáveis independentes. As variáveis que apresentaram melhores correlações foram o SAVI, SR e NDVI. A utilização de imagens de satélite de alta resolução espacial possibilitou a realização da estimativa do volume de madeira para plantios de *Eucalyptus*. Com a utilização dessa metodologia, foi possível ainda realizar o mapeamento e a análise espacial das áreas de estudo de maneira mais rápida e econômica.

De maneira geral para os povoamentos em que o fechamento do copado não ocorre, o índice de vegetação SAVI originou funções com melhor desempenho que os demais índices testados.

Observando os mapas de volume de madeira gerados, foi possível verificar quanto o desenvolvimento pode ser desuniforme dentro de uma mesma espécie e também foi possível obter valores reais do volume de madeira que poderá ser obtido nos plantios de eucalipto.

Esta metodologia de avaliação do volume tem como principal vantagem a avaliação de toda área para *Eucalyptus* sp. ao contrário das metodologias que recorrem a inventário florestal e métodos de extrapolação para a avaliação por unidade de área.

Novos estudos com outras espécies florestais estão sendo elaborados e os mesmos poderão contribuir para uma maior validação da metodologia.

## AGRADECIMENTOS

Ao Programa Ciência Sem Fronteira e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pela bolsa concedida para realização do Doutorado Sanduíche na Universidade de Évora - Portugal. A Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp – Campus de Ilha Solteira) pela imagem Pléiades disponibilizada. A empresa Eldorado Brasil pela cedência dos dados de inventário.

Este trabalho foi cofinanciado pelos fundos do FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade - COMPETE e fundos Nacionais da FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto UID/AGR/00115/2013.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERTSEN, W.; KINT, V.; VAN ORSHOVEN, J.; OZKAN, K.; MUIYS, B. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling*, Kidlington, v. 221, n. 8, p. 1119-1130, 2010.

ARDÖ J. Volume quantification of Coniferous forest compartments using Spectral Radiance recorded by Landsat Thematic Mapper. *International Journal of Remote Sensing*, London, v. 13, n. 9, p. 1779-1786, 1992.

AUSTIN, J. M.; MACKEY, B. G.; VAN NIEL, K. P. Estimating forest biomass using satellite radar: an exploratory study in a temperate Australian *Eucalyptus* forest. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 176, n. 1-3, p. 575-583, 2003.

BERRA, E. F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R.S.; SEBEM, E.; GOERGEN, L. C.; BENEDETTI, A.C.P.; LIPPERT, D. B. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 853-864, 2012.

BERRA, E. F. *Avaliação e Comparação de imagens LISS-III/RESOURCESAT-1 e TM/LANDSAT 5 para estimar volume de madeira de um plantio de *Pinus elliottii**. 2013. 127 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

BERGER, A.; GSCHWANTNER, T.; McROBERTS, R.E.; SCHADAUER, K. Effects of Measurement Errors on Individual Tree Stem Volume Estimates for the Austrian National Forest Inventory. *Forest Science*, Bethesda, v. 60, n. 1, p. 14-24, 2014.



- BUCKLEY, D.S.; ISEBRANDS, J.G.; SHARIK, T.L. Practical field methods of estimating canopy cover, PAR, and LAI in Michigan oak and pine stands. **Northern Journal of Applied Forestry**, v. 16, n. 1, p. 25–32, 1999.
- CLUTTER, J. L. **Timber Management: A quantitative approach**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 1983.
- COHEN, W.B.; MAIERSPERGER, T. K.; SPIES, T. A.; OETTER, D.R. Modelling forest cover attributes as continuous variables in a regional context with Thematic Mapper data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 22, n. 12, p. 2279-2310, 2001.
- DRAKE, J. B.; DUBAYAH, R. O.; CLARK, D. B.; KNOX, R. G.; BLAIR, J. B.; HOFTON, M. A.; CHAZDON, R. L.; WEISHAMPEL, J. F.; PRINCE, S. D. Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 79, n. 2-3, p. 305–319, 2002a.
- DRAKE, J.B.; DUBAYAH, R.O.; KNOX, R.G.; CLARK, D.B.; BLAIR, J.B. Sensitivity of large-footprint lidar to canopy structure and biomass in a neotropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 81, n. 2-3, p. 378–392, 2002b.
- ESRI. **ArcGIS Desktop**: release 10. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2010.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa, 1999. 412 p.
- FAZAKAS, Z.; NILSSON, M.; OLSSON, H. Regional forest biomass and wood volume estimation using satellite data and ancillary data. **Agricultural and Forest Meteorology**, New Haven, v. 98, n. 1, p. 417-425, 1999.
- HÄME, T.; SALLI, A.; ANDERSSON, K.; LOHI, A. Forest biomass estimation in northern Europe using NOAA AVHRR Data. In: CIRCUMPOLAR SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF THE POLAR ENVIRONMENT, 4. 1996, Denmark. **Anais...**Denmark: TUD Lyngby, 1996. p. 183 – 190.
- HUETE, A.R.; JACKSON, R.D.; POST, D.F. Spectral response of a plant canopy with different soil background. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 17, n. 1, p. 37-53, 1985.
- HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, New York. v. 25, n. 3, p. 295-309, 1988.
- HUETE, A. R.; JUSTICE, C.; VAN LEEUWEN, W. **MODIS vegetation index (MOD13): algorithm theoretical basis document**, version 2. Tucson: University of Arizona, 1996.
- JACKSON, R. D.; HUETE, A. R. Interpreting vegetation indices. **Preventive veterinary medicine**, v. 11, n. 4, p. 185-200, 1991.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604 p.
- JORDAN, C.F. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v. 50, n. 4, p. 663–666, 1969.
- KRANKINA, O. N.; HARMON, M. E.; COHEN, W. B.; OETTER, D. R.; ZYRINA, O.; DUANE, M. V. Carbon stores, sinks, and sources in forests of Northwestern Russia: Can we reconcile forest inventories with remote sensing results? **Climatic Change**, v. 67, p. 257-272, 2004.
- KATILA, M.; TOMPPA, E. Selecting estimation parameters for the Finnish multisource National Forest Inventory. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 76, n. 1, p. 16 – 32, 2001.

- MÄKELÄ, H.; PEKKARIEN, A. Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 196, n. 2-3, p. 245-255, 2004.
- McROBERTS, R. E.; TROMPPO, E. O. Remote sensing support for national forest inventories. **Remote Sensing of Environment**, Nw York, v. 110, p. 412-419, 2007.
- MOHAMMADI, J.; SHATAEE, S.; BABANEZHAD, M. Estimation of forest stand volume, tree density and biodiversity using Landsat ETM+ Data, comparison of linear and regression tree Analyses. **Procedia Environmental Sciences**, v. 7, p. 299 – 304, 2011.
- MOHAMMADI, F.; SHABANIAN, N.; POURHASHEMI, M.; FATEHI, P. Risk zone mapping of forest fire using GIS and AHP in a part of Paveh forests. **Iranian Journal of Forest and Poplar Research**, Tehran, v. 18, n. 4, p. 586-595, 2010.
- MYERS, R. H. **Classical and modern regression with applications**. Boston: Duxbury, 1986.
- NILSSON, M. **Estimation of forest variables using satellite image data and airborne lidar**. 1997. (PhD thesis) - Swedish University of Agricultural Sciences, Silvestria, 1997.
- OZDEMIR, I. Estimating stem volume by tree crown area and tree shadow area extracted from pan sharpened Quickbird imagery in open Crimean juniper forests, **International Journal of Remote Sensing**, London, v.29, n.19, p. 5643-5655, 2008.
- PAULO, J. A.; PALMA, J. H. N.; GOMES A. A.; FAIAS, S. P.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M. Predicting site index from climate and soil variables for cork oak (*Quercus suber* L.) stands in Portugal. **New forests**, Amsterdam, v.46, n. 2, p.293-307, 2015.
- PETERSON, D.L.; RUNNING, S.W. Applications in forest science and management. In: ASRAR, G. **Theory and Applications of Optical Remote Sensing** Wiley: New York, 1989. p. 429-473.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: A. Silva Vieira, 2009. 127 p.
- POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 5, p. 564-577, 2003.
- POWELL, S. L.; COHEN, W. B.; HEALEY, S. P.; KENNEDY, R. E.; MOISEN, G. G., PIERCE, K. B. Quantification of live aboveground forest biomass dynamics with Landsat time-series and field inventory data: a comparison of empirical modeling approaches. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 114, n. 5, p. 1053-1068, 2010.
- QUEIROZ, M. M.; LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; FERREIRA, M. A. Comportamento de materiais genéticos de eucalipto em Paty do Alferes, RJ. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.16, n.1, p.01 – 10, 2009.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2012.
- RAUSTE, J.; HÄME, T. Radar-based forest biomass estimation. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 15, n. 14, p. 2797-2808, 1994.
- ROBINOVE, C. J.; CHAVEZ, J. R.; GEHRING, D.; HOLMGREN, R. Arid land monitoring using Landsat Albedo Difference Images. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 11, p. 133-56, 1981.

RODRIGUES, G. B.; MALTONI, K. L.; CASSIOLATO, A. M. R. Dinâmica da regeneração do subsolo de áreas degradadas dentro do bioma Cerrado. **Agriambi**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 73-80, 2007.

ROSENQVIST, Å.; MILNE, A.; LUCAS, R.; IMHOFF, M.; DOBSON, C. A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. **Environmental Science & Policy**, v. 6, n. 5, p. 441-455, 2003.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: ERTS SYMPOSIUM, 3., [S. l.]. **Proceedings...** [S. l.]: NASA SP-351, p. 309-317, 1973.

SANQUETTA, C.R.; BALBINOT, R. Metodologias para a determinação de biomassa florestal. In: SANQUETTA, C.R. et al. **Fixação de Carbono** – atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2004. p.77-93.

SCHUMACHER, F.; HALL, F. Logarithmic expression. Of timber-tree volume. **Journal of agricultural research**, Washington, v. 47, n. 9, p. 719 – 734. 1933.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B.; CHEN, H. J. A comparative study of various tests of normality. **Journal of the American Statistical Association**, Alexandriam v. 63, n. 324, p. 1343-1372, 1968.

SILVA, S. T. **Espacialização do volume de madeira no Cerrado Ssensu Strictu em Minas Gerais**. 2014. 99 p. Tese (Doutorado em Manejo Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

SPANNER, M. A.; PIERCE, L. L.; PETERSON, D. L.; RUNNING, S. W. Remote Sensing temperate coniferous forest leaf area index. The influence of canopy closure, understory and background reflectance. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 11, n. 1, p. 95-111, 1990.

SOUSA, A. M. O., GONÇALVES, A. C., MESQUITA, P.; MARQUES DA SILVA, J. R. Biomass estimation with high resolution satellite images: A case study of Quercus rotundifolia. **ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing**, v. 101, p. 69-79, 2015.

TURNER, D.P.; GUZY, M.; LEFSKY, M. A.; RITTS, W. D.; Van TUYL, S.; LAW, B. E. Monitoring forest carbon sequestration with remote sensing and carbon cycle modeling. **Environmental Management**, 33, n. 4, 457-466, 2004.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C.; FREITAS, C. C. Estimativa de IAF de plantações de eucaliptos a partir de dados TM/Landsat. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., 1998, Santos. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1998. p. 1585-1596.

WANG, Q.; ADIKU, S.; TENHUNEN, J.; GRANIER, A. On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 94, n. 2, p. 244-255, 2005.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANGUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

ZANZARINI, F. V.; PISSARA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 6, p. 608-614, 2013.

Recebido em 17/12/2015

Aceito para publicação em 23/12/2016

