



ARTIGO ORIGINAL

Estimativa de volume de madeira baseada em índices de vegetação

Estimate of wood volume based on vegetation indices

Paulo Vinicius Silva Dai¹ , Fabio Henrique Rojo Baio¹ , Gileno Brito de Azevedo¹ , Luana Alves Fagundes¹ , Amanda Camila Silva Trento¹ 

¹Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS, Chapadão do Sul, MS, Brasil

Como citar: Dai, P. V. S., Baio, F. H. R., Azevedo, G. B., Fagundes, L. A., Trento, A. C. S. (2021). Estimativa de volume de madeira baseada em índices de vegetação. *Scientia Forestalis*, 49(129), e3301. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.06>

Resumo

O volume de madeira das plantações florestais é tradicionalmente estimado por meio dos inventários florestais, nos quais variáveis dendrométricas são mensuradas em parcelas no campo, permitindo gerar estimativas da produção em toda a plantação. Recentemente, uma das alternativas que vêm sendo utilizada com sucesso para esse fim é o uso de índices de vegetação (IV), obtidos por meio do sensoriamento remoto. Esses índices podem facilitar a estimativa de volume de populações florestais tornando o trabalho mais prático. O objetivo do presente trabalho foi correlacionar os índices de vegetação de plantios florestais com o volume obtido no inventário florestal tradicional, e ajustar modelos alométricos para gerar estimativas volumétricas do povoamento em função dos IV. Foi realizado o inventário florestal em três talhões de eucalipto, com idades de 30 meses (T1), 48 meses (T2) e 72 meses (T3), onde foram obtidos o volume de madeira por hectare em 15 parcelas de 300 m² de área cada. Os IV foram calculados de imagens obtidas com um RPA (Aeronave Remotamente Pilotado), fabricado pela SenseFly, modelo eBee, equipado com sensor multiespectral Parrot Sequoia. Os índices de vegetação EVI, NDRE e NDVI apresentaram maior correlação com o volume de madeira (0,58, 0,62 e 0,44) nos talhões T1, T2, T3, respectivamente.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Inventário Florestal; RPA.

Abstract

The wood volume of forest plantations is traditionally estimated through forest inventories, in which dendrometric variables are measured in plots in the field, allowing to generate estimates of production throughout the plantation. Recently, one of the alternatives that have been successfully used for this purpose is the use of vegetation indices (IV), obtained through remote sensing. These indices can facilitate the estimation of forest population volume rendering the work more practical. The objective of the present study was to correlate the vegetation indices of forest plantations with the volume obtained in the traditional forest inventory and to adjust allometric models to generate volumetric estimates of stand as related to IV. Forest inventory was carried out in three eucalyptus stands, aged 30 months (T1), 48 months (T2) and 72 months (T3), where the volume of wood per hectare was obtained in 15 plots of 300 m² each. The IVs were calculated from images obtained with an RPA (Remotely Piloted Aircraft) manufactured by a SenseFly, eBee model, equipped with a Parrot Sequoia multispectral sensor. Vegetation indexes EVI, NDRE and NDVI were more correlated with wood volume (0.58, 0.62 and 0.44) in T1, T2, T3 plots, respectively.

Keywords: Remote Sensing; Forest Mensuration; RPA.

Fonte de financiamento: Nenhuma.

Conflito de interesse: Nada a declarar.

Autor correspondente: pvsdai@hotmail.com

Recebido: 27 fevereiro 2019.

Aceito: 04 abril 2020.

Editor: Paulo Henrique Müller Silva.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTRODUÇÃO

O volume de madeira é uma variável fundamental para avaliar o potencial de crescimento e produção dos povoamentos florestais e fornece informações essenciais para o planejamento da produção florestal (Azevedo et al., 2011). Nos inventários florestais tradicionais, normalmente o procedimento mais usual para estimar o volume de madeira consiste na obtenção de variáveis de fácil obtenção (como o diâmetro à altura do peito – DAP e a altura) em árvores localizadas em parcelas instaladas no campo. Por sua vez, o volume dessas árvores é estimado por meio de técnicas indiretas, como equações volumétricas e hipsométricas, funções de afilamento e fatores de forma (Schroder et al., 2015; Souza et al., 2016; Macedo et al., 2017) derivadas de medições diretas (cubagem rigorosa) de algumas árvores no povoamento florestal.

Apesar de serem eficientes esses procedimentos, a quantificação do volume de madeira nos povoamentos florestais, por muitas vezes é uma atividade dispendiosa, lenta, requer tempo, trabalho intenso e mão de obra qualificada, além disso, a sua realização ser complicada em florestas densas e locais de difícil acesso (Berra et al., 2012; Macedo et al., 2017). Dessa forma, têm se buscado alternativas para otimizar as atividades de inventários florestais, como a predição da variável volumétrica de povoamentos florestais a partir de informações obtidas pelo sensoriamento remoto (Souza et al., 2007; Berra et al., 2012; Wink et al., 2012; Leal et al., 2013; Miguel et al., 2015; Leal et al., 2016; Goergen et al., 2016; Macedo et al., 2017).

A estimativa do volume de madeira por meio de sensoriamento remoto consiste na associação de dados de reflectância, obtidos com o uso de imagens, com dados do povoamento, aferidos em parcelas instaladas no campo (Rosenqvist et al., 2003; Macedo et al., 2017). Essa associação pode ser realizada com auxílio dos índices de vegetação (IV), que consistem em medidas radiométricas adimensionais, geradas a partir de uma imagem monocromática por meio da combinação de determinados canais ou bandas espectrais (Macedo et al., 2017). Para calcular os IV é necessário realizar a captação das imagens, através do sensoriamento remoto, utilizando como exemplo drones, satélites ou aeronaves remotamente pilotadas (RPA), veículos aéreos não tripulados (vant) e aeronaves tripuladas entre outros meios.

Segundo Ponzoni et al. (2012), ao obter as imagens contendo a refletância radiométrica da cena, pode-se associar as propriedades espectrais da vegetação, especialmente nas regiões do visível e do infravermelho próximo e, portanto, calcular os IV. Esses índices são correlacionados com parâmetros biofísicos da cobertura vegetal, como biomassa, índice de área foliar, e variáveis estimadas por equações alométricas de volume e altura de planta.

Berra et al. (2012), realizaram experimento para desenvolver modelos para estimar o volume de madeira em *Eucalyptus sp.* a partir de imagens do Landsat 5. Calcularam os índices NDVI, SR (*Single Ratio*), aplicaram uma função linear e concluíram que os dois índices tiveram alta correlação positiva e foram bons estimadores de volume de madeira.

Os resultados finais da estimativa do volume podem sofrer algumas influências por vários fatores como espaçamento entre plantas, idades diferentes, arquitetura de copa, espalhamento e fechamento do dossel. O objetivo do presente trabalho foi correlacionar os índices de vegetação de plantios florestais com o volume obtido no inventário florestal tradicional, e ajustar modelos alométricos para gerar estimativas volumétricas do povoamento em função dos IV.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em três talhões de *Eucalyptus urophylla* (Clone AEC 144), cujas características dendrométricas são apresentadas na (Tabela 1). Os talhões estão localizados na Fazenda Campo Bom, região do Bolsão, em Chapadão do Sul, Mato Grosso do Sul com coordenadas geográficas 18°44'22" S e 52°37'12" W. Na região há predomínio da classe dos Latossolo (Santos et al., 2018). O clima, é classificado pelo método de Köppen como tropical úmido, a temperatura anual fica compreendida entre 13 e 29 °C, a precipitação pluviométrica

média é de 1.850 mm, com concentração de chuva no verão e seca no inverno (Cunha et al., 2013).

Tabela 1. Características dendrométricas dos talhões avaliados.

Variável	Talhão 1 (T1)	Talhão 2 (T2)	Talhão 3 (T3)
Área (ha)	30,4	22,1	24
Idade (meses)	30	48	72
Número de árvores por hectare	1.222,2	1.208,9	1.126,7
DAP médio (cm)	11,9	14,7	16,3
Altura média das árvores (m)	17,5	22,4	27,3
Área basal (m ² ha ⁻¹)	13,69	20,71	24,41
Volume total (m ³ ha ⁻¹)	110,33	223,9	329,35

DAP = diâmetro obtido na altura de 1,3 m do nível do solo.

Foram obtidas fotografias aéreas em cada um dos talhões, utilizando a aeronave remotamente pilotadas (RPA) de asa fixa, marca eBee RTK (empresa Sensefly S.A., Cheseaux Lausanne-Suíça) com controle autônomo de decolagem, plano de vôo e aterrissagem. O RPA foi equipado com o sensor multiespectral Parrot Sequoia de 32 bits (empresa Parrot, Cheseaux Lausanne-Suíça). Esse sensor fez aquisição da reflectância nos comprimentos de onda do verde (550 nm), vermelho (660 nm), borda do infravermelho (735 nm) e infravermelho próximo (790 nm), possuindo, ainda um sensor de luminosidade que permite a calibração dos valores adquiridos. As informações adquiridas por esses comprimentos de ondas possibilitaram o cálculo de diversos IV avaliados no estudo.

As imagens aéreas foram tomadas no mesmo período de aquisição em talhões de diferentes idades da cultura, permitindo a construção de uma análise comparativa entre os mapas de IV gerados para cada talhão. As imagens foram mosaicadas e ortorretificadas pelo programa computacional Pix4Dmapper. Os mapas dos IV e os mapas de prescrição foram processados pelo programa de sistemas de informações geográficas (SIG) ESRI ArcGis 10.5.

Para garantir a obtenção de informações em áreas com diferentes reflectâncias radiométricas dentro dos talhões, cada um deles foi classificado em três zonas de manejo (alta, média e baixa), definida com base no NDVI (Figure 1). A segmentação dessas três zonas de manejo do índice de vegetação NDVI foi realizada conforme metodologia descrita por Salvador & Antuniassi (2011). Posteriormente, dentro de cada zona de manejo foram definidos cinco pontos amostrais para a obtenção dos IV e do volume de madeira no campo.

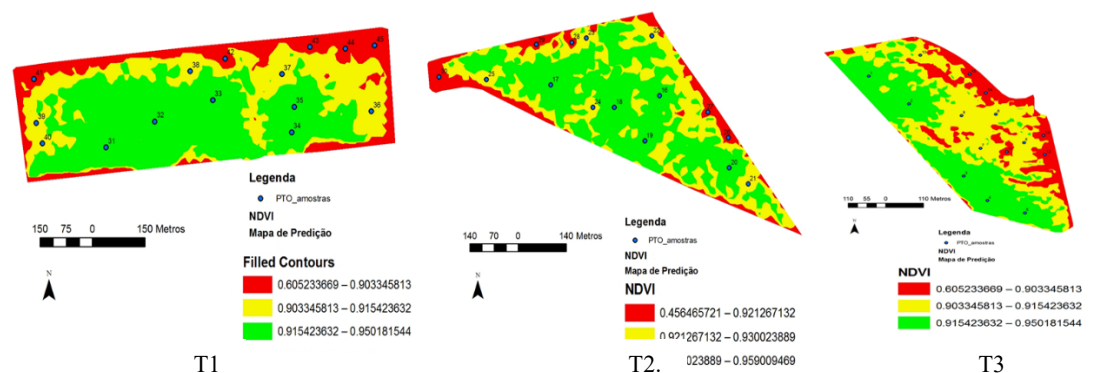


Figura 1. Mapas da variabilidade espacial do NDVI e da distribuição de pontos amostrais em três classes nos talhões T1, T2 e T3.

Os índices de vegetação estudados (Tabela 2) foram selecionados em função da maior correlação com a massa vegetal, segundo Raper & Varco (2015). Alguns desses índices preconizam o uso do infravermelho próximo, entre as reflectâncias de 680 a 750 nm, denominado de *Red Edge* (Weis & Sökefeld, 2010).

Tabela 2. Relação dos índices de vegetação calculados pelo uso do sensor multiespectral Sequoia.

Sigla do Índice de Vegetação	Índice de Vegetação	Equação	Referências Bibliográficas
<i>NIR/Green</i>	Índice de vegetação do infra vermelho e verde	R_{NIR} / R_{GREEN}	Gitelson & Merzlyak (1997)
<i>NDVI</i>	Índice de vegetação pela diferença normalizada	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	Rouse et al. (1973)
<i>GNDVI</i>	Índice de vegetação pela diferença normalizada ao verde	$(R_{NIR} - R_{GREEN}) / (R_{NIR} + R_{GREEN})$	Gitelson et al. (1996)
<i>IV Red Edge (Iv_RE)</i>	Índice de vegetação da borda do vermelho	$(\ln R_{NIR} - \ln R_{EDGE}) * 100$	Jasper et al. (2009)
<i>NDRE</i>	Índice de vegetação pela diferença normalizada à transição do vermelho (<i>red edge</i>).	$(R_{NIR} - R_{EDGE}) / (R_{NIR} + R_{EDGE})$	Gitelson & Merzlyak (1994)
<i>SAVI</i>	Índice de Vegetação ajustado ao solo	$(1+L) * (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + L)$	Huete (1988)
<i>SR</i>	Razão simples	R_{NIR} / R_{RED}	Jordan (1969)
<i>IAF</i>	Índice de área foliar	$-\ln(0.69 - SAVI / 0.59) / 0.91$	Allen et al. (2002)
<i>EVI</i>	Índice de vegetação melhorada	$G * (R_{NIR} * R_{RED}) / (L + R_{NIR} + C1 * R_{RED} - C2 * R_{BLUE})$	Justice et al. (1998)

Para a obtenção do volume de madeira em cada um dos 45 pontos amostrais, foi delimitado uma parcela circular com 300 m² de área em cada um deles. Nessas parcelas foram mensurados o diâmetro a altura do peito (DAP) de todas as árvores da parcela, com auxílio de uma suta mecânica, e obtida a altura das árvores localizada na linha central da parcela, com auxílio de um clinômetro. As demais alturas das árvores do povoamento foram estimadas por meio de equações hipsométricas desenvolvidas para cada um dos talhões (Tabela 3).

Para a obtenção do volume do fuste das árvores foram utilizadas equações volumétricas (Tabela 3), obtidas com o ajuste de modelos volumétricos com dados da cubagem rigorosa das árvores das parcelas, realizada em cada talhão. O volume de madeira em cada parcela foi obtido pelo somatório dos volumes individuais das árvores, que foram extrapolados para a unidade em m³ por hectare.

Para verificar se houve diferença estatística entre os volumes (m³ ha⁻¹) nas zonas de manejo, foi feito teste de média de Tukey, o delineamento em DIC (Delineamento Inteiramente Casualizado) de cada talhão, os dados foram submetidos à análise de variância com auxílio do programa Sigmaplot, para geração dos gráficos e obtenção dos valores de coeficiente de correlação (r), p-valor e o 'F'. Foram avaliados três tratamentos e cinco repetições por zona de manejo.

Diante das informações obtidas em cada ponto amostral, foram ajustados modelos de regressão para gerar estimativas do volume de madeira (m³ ha⁻¹) em função dos IV. Para selecionar os IV que melhor explicam a variação do volume de madeira dentro dos talhões,

primeiramente foi avaliado a correlação de Pearson entre as variáveis obtidas. A correlação foi representada por uma rede de correlações, em que as variáveis (nós) são conectadas por linhas, que possuem espessura proporcional ao valor absoluto da correlação entre as mesmas. Foi adotado o valor de corte igual 0,60, significando que apenas $|r_{ij}| \geq 0,60$ tem as suas arestas em destaque. As correlações positivas foram destacadas na cor verde, enquanto as negativas foram representadas em vermelho.

Tabela 3. Equações hipsométricas e volumétricas utilizadas para gerar estimativas da produção nos talhões.

Talhão	Variável	Equação	R ²	S _{yx} %
1	Altura	$Ht = 8,0453 - 0,6261DAP + 0,2621DAP^2 - 0,0119DAP^3$	0,9902	1,04
	Volume	$LnV = -8,1921 + 1,9225LnDAP + 0,3561LnHt$	0,9846	5,17
2	Altura	$Ht = 1,4228 * 0,9341^{DAP} * DAP^{1,4023}$	0,9626	2,52
	Volume	$LnV = -9,8523 + 1,9468LnDAP + 0,9372LnHt$	0,9914	5,39
3	Altura	$Ht = 10,5077 - 1,4349 * DAP + 0,4044 * DAP^2 - 0,0204 * DAP^3 + 0,0003 * DAP^4$	0,9118	6,77
	Volume	$LnV = -10,5053 + 1,6445LnDAP + 1,3967LnHt$	0,9853	7,64

Em que: Ht = altura total (m); DAP = diâmetro a altura de 1,3 m do nível do solo; V = volume (m³); Ln = logaritmo neperiano; R² = coeficiente de determinação; S_{yx}% = erro padrão da estimativa.

Posteriormente, foi realizada análise de variáveis canônicas para verificar a similaridade entre os volumes de cada talhão com os IV. Essas últimas análises foram realizadas com o auxílio do programa RBio (Bhering, 2017).

As equações alométricas para estimar o volume de madeira em função dos IV foram obtidas utilizando o programa Excel. A qualidade do ajuste foi avaliada pela correlação entre valores de volume observados e estimados (r), erro padrão da estimativa (S_{yx}%) e análise gráfica dos resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Pela rede de correlações gerada a partir da matriz de correlações de Pearson, é possível observar uma relação positiva entre o volume de madeira por hectare (V) e os IV estudados (Figura 2) para o T1. Com exceção dos outros IV, os índices de vegetação EVI, IAF, SAVI apresentaram uma ligação próxima com o volume.

Porém, o EVI obteve maior valor de correlação com a variável apresentando r de 0,58 e r² de 0,34. No entanto, visualmente na matriz de correlação o SAVI está mais próximo da variável volume, porém seu valor apresentou um r de 0,5 e R² de 0,25.

Os outros índices não foram significativos por diversos fatores ambientais, sub-bosques, solo exposto, anatômicos, densidade da massa vegetal, IAF, estrutura anatômica celular, arquitetura e disposição da copa, falha de plantio entre outros fatores interferem na captação da reflectância emitida pelo objeto ao sensor.

Analisando a correlação de Pearson, pode-se afirmar que a variação das correlações positivas entre os talhões, a causa explica-se devido as diferentes idades avaliadas no trabalho.

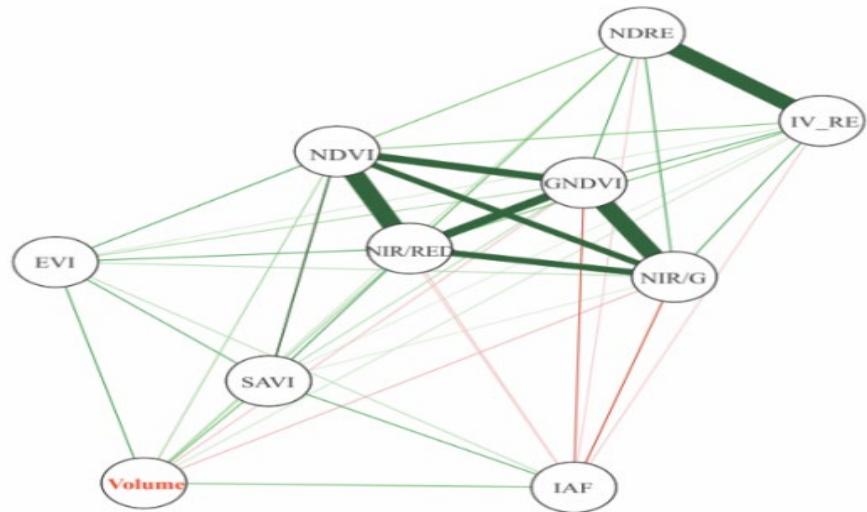


Figura 2. Rede de correlações entre os IV e o volume de madeira ($m^3 ha^{-1}$) para o talhão 1 (T1).

No T2 (Figura 3) observa-se uma interação entres os índices de vegetação EVI, NDRE e IV_RE com o volume. Contudo, o índice NDRE correlacionou-se positivamente e fortemente com o volume de madeira estimado apresentando r de 0,62 e r^2 de 0,38. O índice de vegetação *Red Edge* (IV_RE) teve um (r de 0,61).

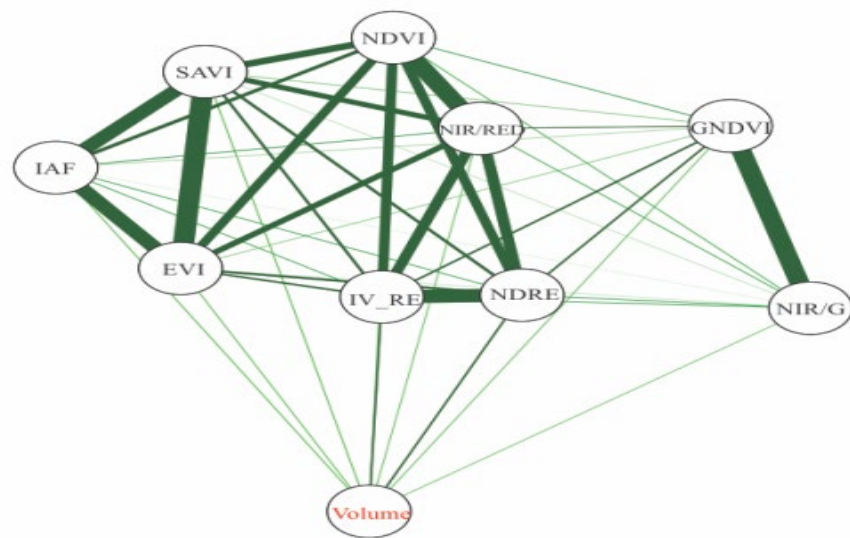


Figura 3. Rede de correlações entre os IV e o volume de madeira ($m^3 ha^{-1}$) para o talhão 2 (T2).

As correlações positivas são encontradas para áreas florestais com dosséis fechados e correlações negativas são encontradas para áreas com dosséis abertos (Macedo et al., 2017).

No T3 (Figura 4) os índices de vegetação que obteve uma ligação com o volume foram IAF, NDVI e GNDVI. No entanto, o índice NDVI foi o que apresentou maior valor de correlação r (0,44) com a variável volume e de determinação (0,19).

A análise das variáveis canônicas (Figura 5) foi realizada com objetivo de verificar a similaridade entre os tratamentos e quais as variáveis contribuíram para isto. O primeiro componente das variáveis canônicas captou 72,7% da variância total entre os tratamentos.

Portanto, é possível simplificar a variação entre os tratamentos e variáveis em um gráfico bidimensional, conforme critérios de Hair et al. (2009). Verifica-se que o T1 formou um agrupamento com variáveis IAF, SAVI e EVI proporcionando maior similaridade entre si, provavelmente explica-se pela influência das bandas *Red* (vermelha) e *Nir* (infravermelha), (Tabela 2). No entanto, o T2 proporcionou maior similaridade com as variáveis IV_RE e NDRE formando outro agrupamento, provavelmente explica-se pela influência da banda *Redge* (borda vermelha), (Tabela 2). Para o T3, não houve similaridade com nenhum dos índices de vegetação, para este talhão o índice NDVI foi que obteve maior correlação, entretanto, apresenta-se inversamente oposto no gráfico, possivelmente a análise não captou esta correlação neste caso.

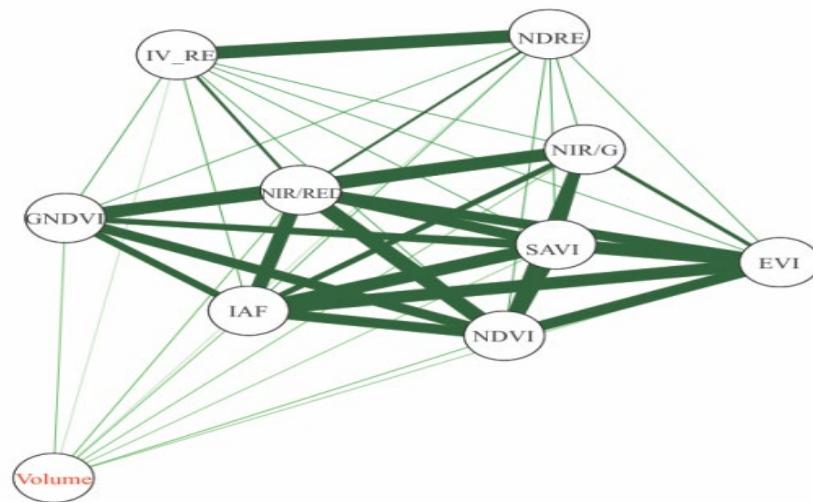


Figura 4. Rede de correlações entre os IV e o volume de madeira ($m^3 ha^{-1}$) para o talhão 3 (T3).

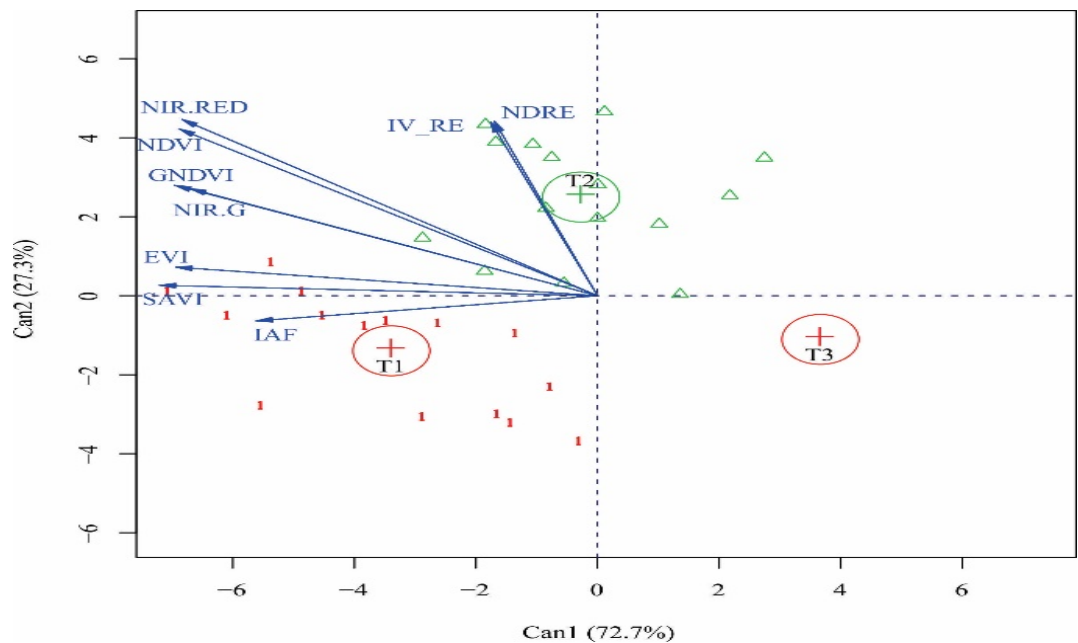


Figura 5. Representação gráfica da variabilidade das variáveis canônicas em relação aos talhões (1:T1; 2:T2; e 3:T3).

Na Tabela 4 apresentam as análises de variâncias para os T1, T2 e T3, respectivamente. Compararam-se as três zonas de manejo (Zm), alta, média e baixa para as médias produtivas de cada talhão. Para o T1 com o teste de Tukey 5%, a média da Zm alta se diferiu da Zm baixa, mas não diferindo da média, estatisticamente. Para T2 a Zm alta, média e baixa não apresentou diferença estatística com o teste de Tukey 5% similarmente ao T3, o erro padrão apresentou valores baixos (Erro <10).

Tabela 4. Análise de variância e Teste de Tukey, segundo os tratamentos avaliados.

T	Fv	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc	Tratam.	Volume (m ³ ha ⁻¹)	DMS	CV%	Erro Padrão	Média Geral
1	ZM	2	594,9	297,4	4,8	0,03	ZM Baixa	103,19 b	13,33	7,16	3,53 NMS=0,05	110,33
	Erro	12	748,1	62,3			ZM Média	109,27 ab				
	TC	14	1342,9				ZM Alta	118,51 a				
2	ZM	2	674,22	337,11	1,3	0,32	ZM Baixa	215,79 a	27,32	7,23	7,24 NMS=0,05	223,99
	Erro	12	3143,24	261,94			ZM Média	223,99 a				
	TC	14	3817,45				ZM Alta	232,21 a				
3	ZM	2	2117,26	1058,63	2,8	0,10	ZM Baixa	317,42 a	33,09	5,95	8,76 NMS=0,05	329,35
	Erro	12	4610,49	384,20			ZM Média	325,07 a				
	TC	14	6727,75				ZM Alta	345,56 a				

T = talhão; ZM = zona de manejo; TC = total corrigido; GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio.

Os IV com maiores correlações com o volume de madeira foram diferentes para os três talhões avaliados. A Figura 6 apresenta a relação entre o volume de madeira e os índices de vegetação com maior correlação com essa variável em cada um dos talhões, bem como as equações alométricas obtidas para cada um deles e suas respectivas estatísticas de precisão.

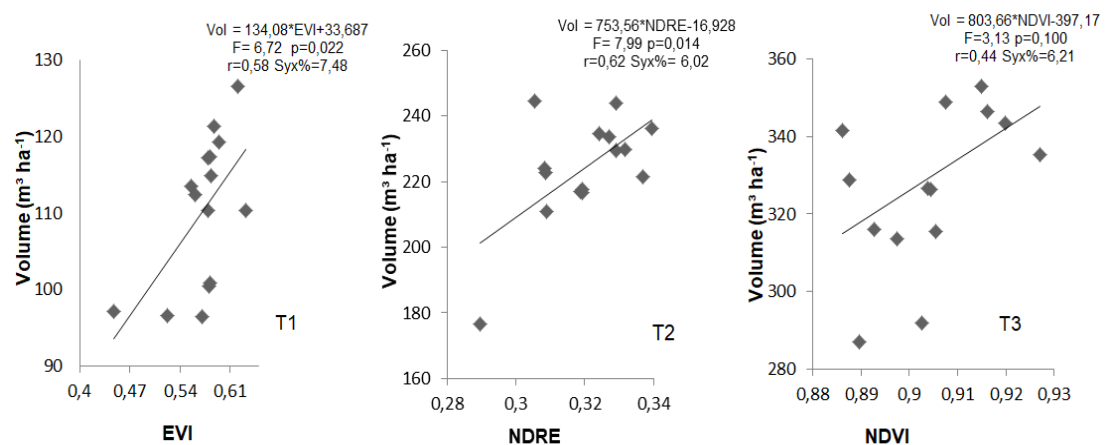


Figura 6. Relação entre os índices de vegetação EVI talhão 1 (idade 30 meses); NDRE talhão 2 (idade 48 meses); NDVI talhão 3 (idade 72 meses) com o volume de madeira (m³ ha⁻¹).

A Figura 7 apresenta a distribuição dos resíduos em função dos índices de vegetação e dos volumes de madeira estimados nos pontos amostrais em cada um dos talhões. As estimativas geradas nos três talhões são livres de tendências, com erros distribuídos em torno de zero, gerando boas estimativas do volume de madeira.

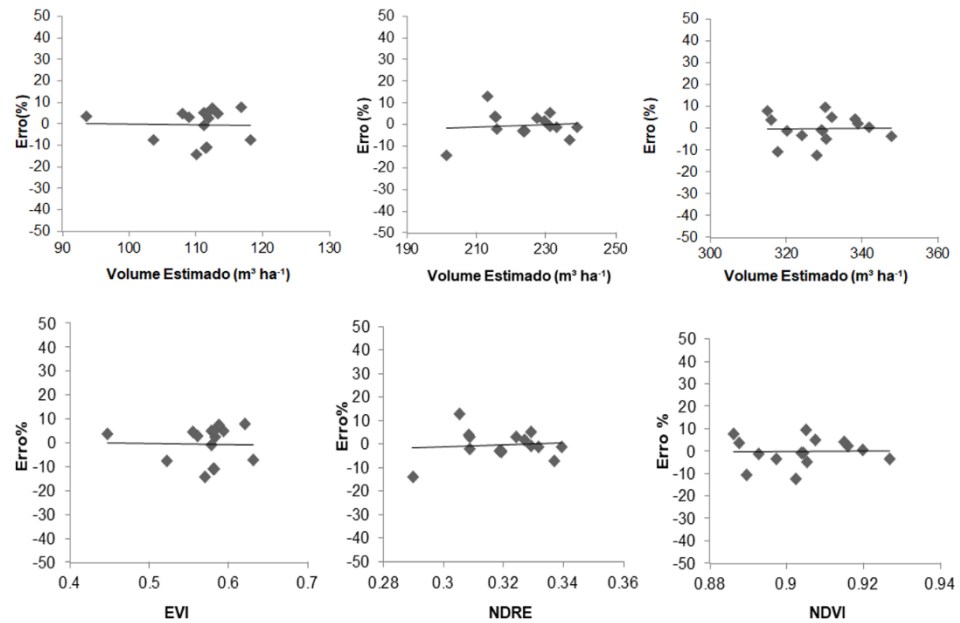


Figura 7. Distribuição de resíduos para o T1 (idade 30 meses), T2 (idade 48 meses), T3 (idade 72 meses).

As maiores correlações obtidas para os índices de vegetação são justificadas devido principalmente por suas composições que utilizam essencialmente as bandas espectrais vermelho e infravermelho, sendo respectivamente bandas em regiões de forte absorção e de máxima refletância, concordando com Macedo et al. (2017).

Segundo Ponzoni et al. (2012) a fundamentação proposta por estes índices está no comportamento antagônico da refletância da vegetação nas duas regiões espectrais (visível e infravermelho próximo), teoricamente quanto maior for a densidade da cobertura vegetal em uma determinada área, menor será a refletância na região do visível, em razão da maior oferta de pigmentos fotossintetizantes, entretanto, terá maior refletância na região do infravermelho próximo, em razão do espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas da folha.

No T1, de menor idade em estudo, houve maior correlação entre os índices vegetação do que os outros talhões com idade mais avançada. Muito provavelmente devido ao fato do eucalipto jovem estar em processo de crescimento, com o fechamento do dossel mais distribuído ao longo do talhão e, portanto o sensor captou um valor maior da cobertura de área foliar.

Plantios de eucalipto com idades mais avançadas no estudo, como no T2 e T3, estão com crescimento menos intenso com maior biomassa vegetal e volume de madeira. Pressupõe-se que a copa está com massa vegetal mais distribuída internamente, ou seja, o dossel do eucalipto encontra-se mais adensado para seu interior, tendo menos espalhamento da cobertura vegetal. Portanto, o sensor capta um valor menor da cobertura de área foliar ao longo de todo o talhão.

Comparado ao trabalho de Leal et al. (2013), observou-se que, utilizando os índices EVI, NDVI, SAVI, EVI₂ e MSAVI₂, a partir de imagens do sensor TM (*Thematic Mapper*) do *Landsat 5*, não estimaram com precisão o volume e diferindo do inventário florestal tradicional.

Miguel et al. (2015) avaliaram os índices SR, NDVI, EVI₂ e SAVI provenientes do sensor LISS-III (*linear imaging self-scanner*), ajustaram modelos de regressão e redes neurais artificiais, encontraram valores de correlações que variaram de fracas a moderadas, no qual SR (0,51), NDVI (0,48), EVI₂ (0,49) e SAVI (0,48), com somente o uso índices de vegetação aplicados.

Nas análises dos dosséis vegetais, a variação da refletância da cobertura vegetal em diferentes bandas espectrais depende, principalmente, da quantidade de folhas e da arquitetura do dossel (Ponzoni et al., 2012).

As baixas correlações entre variáveis dendrométricas e variáveis provenientes de sensoriamento remoto pode ser explicada pelo aspecto da cobertura vegetal gerada por uma imagem de satélite, que é o resultado de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais (Miguel et al., 2015).

Leal et al. (2016) avaliaram três índices de vegetação NDVI, MSAVI e NDRE, provenientes das imagens do satélite RapidEye, estimaram e correlacionaram com o volume do *Eucalyptus urophylla* de 6,5 anos de idade com uso de redes neurais artificiais. Observaram que o NDRE apresentou maior coeficiente de correlação com o volume de madeira (0,609), entretanto o NDVI e MSAVI apresentaram valores inferiores (0,582 e 0,565, respectivamente).

Semelhantemente ao trabalho de Berra (2013), porém utilizou imagens de dois sensores orbitais, o LISS-3 e o TM, para cálculo dos índices SR, NDVI, SAVI, MVI e GNDVI, para estimar o volume da espécie *Pinus elliottii* através de uma equação linearizada. Enfatizando os índices GNDVI e NDVI, o autor encontrou correlações de r (0,58), o GNDVI com o volume para LISS-3 e r (0,52) para o TM, no caso do NDVI com o volume r (0,47) no sensor LISS-3 e r (0,42) no TM. Obviamente o tipo foliar (acículas) e arquitetura de copa do Pinus, diferem do eucalipto para comparar valores de correlação, porém serve de referência para uso do NDVI e GNDVI na estimativa de volume.

Wink et al. (2012) observaram que o índice de abrangência (IA) – razão entre o diâmetro de copa e a altura total da árvore – diminuiu em povoamentos de *Eucalyptus* sp. com 44 meses de idade, em comparação ao povoamento com 24 meses, assim como o índice de saliência (IS) – relação entre o diâmetro de copa e o DAP. Ou seja, o crescimento das árvores pode não ter relação direta com o aumento da copa e, quantidade de folhas verdes ou IAF (Goergen et al., 2016).

CONCLUSÃO

A correlação dos índices de vegetação com o volume de madeira é influenciada pela idade dos povoamentos, não sendo encontrado um único índice de vegetação que apresente adequada correlação com o volume de madeira em todas as idades.

Os índices de vegetação podem ser utilizados para gerar estimativas precisas do volume de madeira de plantios de eucalipto aliados ao inventário florestal.

AGRADECIMENTOS

A Fazenda Campo Bom (F.C.B.) Chapadão do Sul pela parceria com o projeto.

REFERÊNCIAS

- Allen, R., Tasumi, M., & Trezza, R. (2002). *SEBAL -Surface Energy Balance Algorithm for Land- Advanced Training and Users Manual, version 1.0*. Idaho, USA: Idaho Implementation.
- Berra, E. F. (2013). *Avaliação e comparação de imagens LISS-3/Resoucesat-1 e TM/LandSat5 para estimar volume de madeira de um plantio de Pinus Elliottii*. 127 f. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, RS.
- Berra, E. F., Brandelero, C., Pereira, R. S., Sebem, E., Goergen, L. C. G., Benedetti, A. C. P., & Lippert, D. B. (2012). Estimativa do volume total de madeira em espécies de Eucalipto a partir de imagens de Satélite Landsat. *Ciência Florestal, Santa Maria*, 22(4), 853-864. <http://dx.doi.org/10.5902/198050987566>.
- Bhering, L. L. (2017). Rbio: A tool for biometric and statistical analysis using the R Platform. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 17(2), 187-190.
- Cunha, F. F., Magalhaes, F. F., & Castro, M. A. (2013). Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência para Chapadão do Sul-MS. *Engenharia na Agricultura*, 21(2), 159-172.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1994). Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments with autumn chestnut and maple leaves. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology. Netherlands*, 22(3), 247-252. [http://dx.doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](http://dx.doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4).

- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., & Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 289-298.
- Gitelson, A. A., & Merzlyak, M. N. (1997). Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2691-2697. <http://dx.doi.org/10.1080/014311697217558>.
- Goergen, L. C. G., Kilca, R. V., Narvaes, I. S., Silva, M. N., Silva, E. A., Pereira, R. S., & Adami, M. (2016). Distinção de espécies de Eucalipto de diferentes idades por meio de imagens TM/Landsat 5. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, 51(1), 53-60. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2016000100007>.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., & Tatham, R. L. (2009). *Análise multivariada de dados* (6. ed., 688 p.). Porto Alegre: Bookman.
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- Jasper, A., Uhl, D., Machado, N. T. G., Gonçalves, C. V., Guerra-Sommer, M., & Cazzulo-Klepzig, M. (2009). Late Paleozoic wildfires in the South American part of the Gondwana Realm. In: *International Latamamerika- Kolloquium* (pp. 146-147). Göttingen, Germany.
- Jordan, C. F. (1969). Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50(4), 663-6.
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., Privette, J. L., Riggs, G., Strahler, A., Lucht, W., Myneni, R. B., Knyazikhin, Y., Running, S. W., Nemani, R. R., Zhengming, W., Huete, A. R., Van Leeuwen, W., Wolfe, R. E., Giglio, L., Muller, J., Lewis, P., & Barnsley, M. J. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249. <http://dx.doi.org/10.1109/36.701075>.
- Leal, F. A., Miguel, E. P., & Matricardi, E. A. T. (2016). Estimativa do volume em um povoamento de eucalipto utilizando redes neurais artificiais e dados provenientes do satélite RapidEye. In: 3 *MensuFlor*. Piracicaba: ESALQ/LCF.
- Leal, F. A., Matricardi, E. A. T., Oliveira, K. A., & Almeida, G. S. (2013). Índice de vegetação na estimativa do volume em um povoamento de eucalipto. *Enciclopédia Biosfera. Centro Científico Conhecer, Goiânia*, 9(17), 1638.
- Macedo, F. L., Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., Silva, H. R., & Rodrigues, R. A. F. (2017). Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus sp.* com imagens de satélite de alta resolução espacial. *Scientia Forestalis, Piracicaba*, 45(114), 237-247. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.01>.
- Miguel, E. P., Rezende, A. V., Leal, F. A., Matricardi, E. A. T., Vale, A. T., & Pereira, R. S. (2015). Redes Neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. *Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília*, 50(9), 829-839. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000900012>.
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., & Kuplich, T. M. (2012). *Sensoriamento remoto da vegetação* (2. ed.). São Paulo: Oficina de Textos.
- Raper, T. B., & Varco, J. J. (2015). Canopy- scale wavelength and vegetative index sensitivities to cotton growth parameters and nitrogen status. *Precision Agriculture*, 16(1), 62-76.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium* (pp. 309-317). Washington: NASA.
- Salvador, A., & Antuniassi, U. R. (2011). Imagens aéreas multiespectrais na identificação de zonas de manejo em áreas de algodão para aplicação localizada de insumos. *Revista Energia na Agricultura*, 26(2), 1-19.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbrellas, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Filho, J. C. A., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. (5. ed.). Brasília: Embrapa.
- Schroder, T., Costa, E. A., Valerio, A. F., & Lisboa, G. S. (2015). Taper equations for pinus elliottii Engelm. In Southern Paraná, Brazil. *Forest Science*, 61(2), 311-319. <http://dx.doi.org/10.5849/forsci.14-054>.
- Souza, R. R., Nogueira, G. S., Junior, L. S. M., Pelli, E., Oliveira, M. L. R., Abrahão, C. P., & Leite, H. G. (2016). Forma de fuste de árvores de Eucalyptus em plantio com diferentes densidades iniciais. *Scientia Forestalis*, 44(109), 33-40.

- Souza, C. C., Moreira, A. A., Schimith, R. S., Brandão, P. C., & Silva, E. (2007). Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil - Uma revisão bibliográfica. *Ciência Florestal, Santa Maria, 17*(4), 409-417. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981972>.
- Weis, M., & Sökefeld, M. (2010). Precision crop protection. In E.C. Oerke, R. Gerhards, G. Menz & R. Sikora. *Detection and identification of weeds* (1st ed., p. 119-134). Houten: Netherlands Springer.
- Wink, C., Monteiro, J. S., Reinert, D. J., & Liberalesso, E. (2012). Parâmetros da copa e a sua relação com o diâmetro e altura das árvores de eucalipto em diferentes idades. *Scientia Forestalis, 40*(93), 57-67.
- Azevedo, G. B., Sousa, G. T. O., Barreto, P. A. B., & Conceição Júnior, V. (2011). Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, 31*(68), 309-318. <http://dx.doi.org/10.4336/2011.pfb.31.68.309>.
- Rosenqvist, Å., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M., & Dobson, C. (2003). A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy, 6*(5), 441-455. [http://dx.doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00070-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00070-4).

Contribuição dos Autores: PVSD: Investigação, Metodologia, Escrita: primeira redação, Escrita: Revisão e Edição; FHRB: Curadoria de dados, Supervisão, Metodologia, Escrita: Revisão e Edição; GBA: Curadoria de dados, Supervisão, Metodologia, Escrita: Revisão e Edição; LAF: Investigação, Metodologia, Análise Formal; ACST: Investigação, Metodologia, Análise Formal.