

ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NA ESTIMATIVA DO VOLUME EM UM POVOAMENTO DE EUCALIPTO

Fabício Assis Leal¹, Eraldo Aparecido Trondoli Matricardi², Kamilla Andrade de Oliveira³, Glória da Silva Almeida⁴

¹ Engenheiro Florestal, bolsista de doutorado da CAPES, Universidade de Brasília – UnB, Brasília/DF – Brasil. fabricioassisleal@yahoo.com.br

² Professor, Doutor da Universidade de Brasília – UnB, Brasília – DF. Brasil

³ Engenheira Florestal, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. P H Rolfs, s/n - Campus Universitário, CEP 36.570-000 Viçosa - MG, Brasil

⁴ Professora, Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Acre - UFAC, Campus Floresta – Estrada do Canela Fina, Km 12, Gleba Formoso – Cruzeiro do Sul – AC, CEP: 69.980-000

Recebido em: 30/09/2013 – Aprovado em: 08/11/2013 – Publicado em: 01/12/2013

RESUMO

Os procedimentos tradicionais de obtenção de volume devem ser, quando possível, aliados ou implementados com novas técnicas e ferramentas como, por exemplo, o geoprocessamento e sensoriamento remoto. O objetivo deste estudo foi avaliar índices de vegetação como fator de correção do volume e como variável independente em modelos estatísticos para estimativa do volume em um povoamento de eucalipto. Foi conduzida uma análise de correlação entre o volume mensurado para cada parcela e os valores correspondentes dos índices de vegetação, posteriormente fez-se a escolha do índice que compôs a variável independente no modelo de estimativa indireta do volume. Os modelos ajustados apresentaram razoáveis medidas de precisão, com erro padrão da média em torno de 13% e coeficiente de determinação, na maioria dos casos, inferior a 50%. O índice de vegetação médio como correção do volume não estimou com precisão o volume por parcela, diferindo do inventário florestal tradicional pelo Teste T.

PALAVRAS-CHAVE: Equação de volume; inventário florestal; parâmetros biofísicos.

VEGETATION INDEX USED AS A WOOD VOLUME ESTIMATOR IN A SETTLEMENT OF EUCALYPTS

ABSTRACT

The traditional procedures for estimating timber volume should on new techniques and tools, such as geoprocessing and remote sensing. This study involved an assessment of vegetation indices as the timber volume correction factor and as an independent variable in statistical models to estimate the timber volume for a forest stand of eucalyptus. We conducted a correlation analysis between timber volume and each vegetation index applied in this study for choosing best independent variables in the model. The adjusted models showed reasonable precision measurements with the standard error of the mean about 13% and coefficient of determination, in most cases less than 50%. The average vegetation index as a

correction of the volume did not estimate accurately the volume per plot, differing from traditional forest inventory by TTest.

KEYWORDS: Volume equation; forest Inventory; biophysical parameters.

INTRODUÇÃO

Nas atividades florestais e nas avaliações ambientais dos recursos florestais, o inventário florestal é sempre uma técnica muito importante, e talvez até mesmo imprescindível ao bom conhecimento do potencial dos recursos existentes em uma determinada área (SANQUETA et al., 2009).

A partir do inventário florestal é possível estimar diversas variáveis de uma floresta ou de um povoamento, como por exemplo, o volume de madeira. A precisão nas estimativas do volume de um povoamento depende tanto da amostragem do inventário quanto dos métodos utilizados na obtenção do volume das árvores do povoamento, os quais podem ser classificados em métodos diretos (cubagem rigorosa ou peso da árvore) e indiretos (equações de volume, fator de forma, índices de vegetação, etc.) (LEAL, 2013).

Os procedimentos tradicionais de obtenção de volume devem ser, sempre que possível, aliados ou implementados com novas técnicas e ferramentas, como por exemplo, o sensoriamento remoto. Essa junção promove rapidez e facilidade na obtenção do volume como ferramenta viável e com nível aceitável de precisão (WATZLAWICK, 2009).

Para KARNIELI et al. (2002), imagens multitemporais de sensoriamento remoto, transformadas em índices de vegetação (IVs), são ferramentas poderosas usadas para monitorar mudanças ocorridas na cobertura vegetal e na produção de biomassa.

As técnicas de sensoriamento remoto têm sido amplamente utilizadas e aplicadas na área florestal (SOUSA; PONZONI, 1998). Entre os focos para a aplicação dessas técnicas estão a quantificação de biomassa florestal, parâmetros biofísicos e as relações existentes com o povoamento e os tradicionais mapeamentos que caracterizam a vegetação em classes fisionômicas.

Como o volume é a variável de maior importância a ser conhecida num povoamento florestal, cada vez mais os esforços são voltados para sua obtenção a partir de dados advindos do sensoriamento remoto (LEAL, 2013).

Diante dos avanços tecnológicos provenientes de imagens de sensores remotos, bem como do desenvolvimento relacionado ao processamento das imagens, nas estimativas, principalmente, de biomassa, têm-se conseguido bons resultados, onde o fundamento é associar o conteúdo de biomassa e carbono aos dados de radiância/refletância provenientes de imagens de satélite para obter melhores estimativas (WATZLAWICK, 2009).

Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar os índices de vegetação: *Enhanced Vegetation Index* (EVI); *Enhanced Vegetation Index Modified* (EVI₂); *Modified Soil Adjusted Vegetation Index* (MSAVI₂); *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), como fator de correção do volume e como variável independente em modelo matemático para estimativa do volume madeireiro em um povoamento florestal de eucalipto no município de Rio Verde, Goiás.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados para desenvolver este estudo foram obtidos em Rio Verde, estado de Goiás, em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, com 6,5 anos de idade, plantado no espaçamento de 2,8 x 1,8 m, pertencente à Cooperativa Agroindustrial dos Produtores Rurais do Sudoeste Goiano – COMIGO, localizada entre os paralelos 18° 00' 45" e 18° 01' 45" de latitude Sul, e entre os meridianos 50° 52' 45" e 50° 53' 15" de longitude Oeste. A área de estudo possui 116 hectares no total, dividida em sete (7) talhões. A altitude média é de 685 metros. A Figura 1 apresenta a área onde foi realizado o inventário florestal, bem como a espacialização dos talhões.

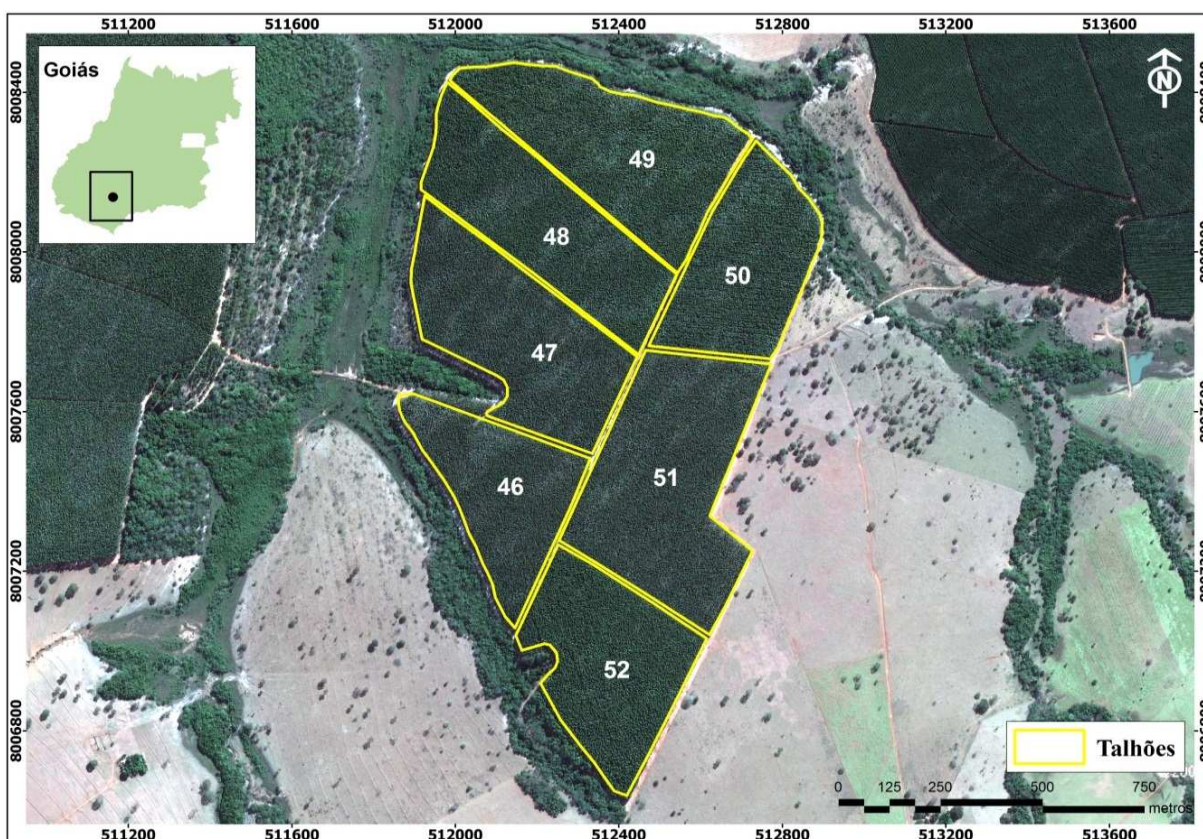


FIGURA 1. Localização da área de estudo e espacialização dos talhões do povoamento florestal estudado.

FONTE: Leal et al. (2011).

O clima, segundo a classificação de KÖPPEN, é do tipo Aw, tropical úmido, caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca, que corresponde ao outono e inverno, indo do mês de maio ao mês de setembro e a outra úmida, com chuvas torrenciais, correspondendo ao período de primavera e verão. A precipitação média anual varia de 1200 a 1500 mm, com média anual em torno de 1300 mm e temperaturas médias em torno de 20° a 25°C.

A área foi subdividida em parcelas de 400 m² e as parcelas inventariadas foram sorteadas aleatoriamente. Foi amostrada uma parcela a cada cinco hectares. O inventário florestal serviu de base para estimar o volume de madeira (m³/parcela)

em todas as unidades amostrais. E para esse procedimento o erro máximo admissível foi de 10% (LEAL et al., 2011).

Para atender este estudo foi utilizada uma imagem multiespectral do satélite *Landsat 5 TM (Thematic Mapper)*, cena 223/72, de 22 de julho de 2011, data essa próxima ao inventário florestal realizado (diferença de 5 dias). Para gerar os índices de vegetação foi necessário fazer uma correção radiométrica e uma conversão de números digitais (ND) para valores de reflectância. Os índices de vegetação utilizados neste trabalho e suas respectivas equações matemáticas são apresentados na (Tabela 1).

TABELA 1. Índices de vegetação ajustados para o trabalho. Rio verde – GO.

Índices de Vegetação	Equação
NDVI	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
SAVI	$SAVI = \frac{(1 + L) (\rho_{NIR} - \rho_{RED})}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + L}$
MSAVI ₂	$MSAVI_2 = \frac{2 NIR + 1 - \sqrt{(2 NIR + 1)^2 - 8 (NIR - RED)}}{2}$
EVI	$EVI = 2,5 \frac{(NIR - RED)}{NIR + (6 * RED - 7,5 * BLUE) + 1}$
EVI ₂	$EVI_2 = 2,5 \frac{NIR - RED}{(NIR + 2,4 * RED + 1)}$

NIR = Banda no infravermelho próximo; RED = Banda no vermelho; BLUE = Banda no azul; L = Fator de ajuste para o substrato (0,5); ρ = Reflectância.

Com o intuito de conhecer a correlação entre o volume (m³/parcela) e os índices de vegetação considerados no estudo foram obtidos os valores médios dos índices de vegetação, em cada parcela, utilizando uma zona de 45 metros de raio a partir do ponto central da parcela.

Assim, com o resultado da análise de correlação foi selecionado o índice apresentando a melhor correlação com o volume da parcela para compor a variável independente nos modelos de regressão. Os modelos ajustados para a obtenção da variável volume (m³/parcela), em função do índice de vegetação são apresentados na (Tabela 2), e os critérios para seleção da melhor equação, foram: Análise gráfica dos resíduos, o erro padrão da estimativa (Syx) e o coeficiente de determinação (R²).

TABELA 2. Modelos ajustados para a estimativa do volume por parcela em função do índice de vegetação. Rio verde – GO.

Autor	Modelo
Berkhout	$Vol = \beta_0 * IV^{\beta_1} + \varepsilon$
Curtis	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{IV} + \varepsilon$
Dissescu-Meyer	$Vol = \beta_1 * IV + \beta_2 * IV^2 + \varepsilon$
Hohenadl-Krenm	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * IV + \beta_2 * IV^2 + \varepsilon$
Kopezky-Gehardt	$Vol = \beta_0 + \beta_1 * IV^2 + \varepsilon$

Vol = Volume por parcela; β_i = Coeficientes a serem estimados; IV = Índice de vegetação; ε = Erro associado ao modelo.

Outra abordagem do estudo foi a estimativa do volume de madeira do povoamento utilizando os índices de vegetação como fator de correção do volume, o qual transformou o volume cilíndrico da parcela em volume real.

O volume real estimado por parcelas foi obtido pelo produto entre o seu volume cilíndrico total e um dos índices médios de vegetação (EVI, EVI₂, MSAVI₂, NDVI, SAVI). O volume estimado de cada parcela, usando o fator de correção, que neste caso é representado por um dos índices médios de vegetação, foi comparado com o volume estimado pelo inventário florestal tradicional (LEAL et al., 2011). Para essa comparação foi aplicado um Teste T para dados pareados, ao nível de 5% de significância.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de volume e índice de vegetação NDVI por parcela foram ajustados os cinco modelos de regressão visando estimar o volume (m³/parcela). A análise de correlação entre os valores médios de índices de vegetação por parcela e o volume de madeira de cada parcela mostrou correlação muito baixa entre os índices de vegetação e o volume. A maior correlação observada foi com o índice NDVI, cujo valor da correlação foi igual a 0,20. Os resultados dos ajustes dos modelos e suas respectivas medidas de precisão são apresentados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

TABELA 3. Equações ajustadas para estimativa do volume (m³/ parcela), utilizando apenas o índice de vegetação NDVI como variável independente. Rio verde – GO.

Modelo	Equação ajustada
Berkhout	$Vol = 12,78970 * NDVI^{0,633466}$
Curtis	$Vol = 15,4037975 - 3,666154738 * \frac{1}{NDVI}$
Dissescu-Meyer	$Vol = 22,2716985 * NDVI - 11,1340421 * NDVI^2$
Hohenadl-Krenm	$Vol = -50,969 + 181,950 * NDVI - 135,786 * NDVI^2$
Kopezky-Gehardt	$Vol = 7,00580 + 6,485735 * NDVI^2$

TABELA 4. Estatísticas de precisão para as equações ajustadas. Rio verde – GO.

Modelo	Syx (m ³)	Syx (%)	R ² ajustado
Berkhout	1,2915	13,10%	0,54
Curtis	1,2953	13,14%	0,18
Dissescu-Meyer	1,2963	13,15%	0,94
Hohenadl-Krenm	1,3136	13,33%	0,21
Kopezky-Gehardt	1,3006	13,20%	0,15

Syx = Erro padrão da estimativa (m³ e %); R² = Coeficiente de determinação;

Conforme apresentado na (Tabela 4), todos os modelos ajustados apresentaram baixas medidas de precisão, com erro padrão da média em torno de 13% e coeficiente de determinação, na maioria dos casos, inferior a 50%. Para GUJARATI (2011), o R² tem um papel muito modesto na análise de regressão, sendo uma medida da qualidade do ajuste. Nada no modelo clássico de regressão

exige que o R^2 seja alto. Assim, um valor de R^2 elevado não é uma evidência favorável ao modelo e um valor de R^2 baixo também não constitui uma prova desfavorável.

O modelo Dissescu-Meyer apresentou R^2 bem alto, sendo de 0,94 (94%). Porém, conforme o preconizado por GUJARATI (2011), essa estatística de ajuste deve ser avaliada com bastante cautela e sempre que possível avaliada juntamente com outros critérios. O fato do modelo de Dissescu-Meyer não apresentar a constante β_0 pode ter influenciado no alto valor de R^2 . Esse fato foi evidenciado nas estatísticas de R^2 na (Tabela 4), onde o único modelo que não apresentou a constante β_0 foi o que teve o maior R^2 . Com isso a linha da regressão que passa pela origem pode mascarar a estimativa do coeficiente de determinação (MATOS, 2000).

Todos os modelos também foram analisados quanto à distribuição dos resíduos. A Figura 2 apresenta os gráficos de distribuição de resíduos para os modelos avaliados neste estudo.

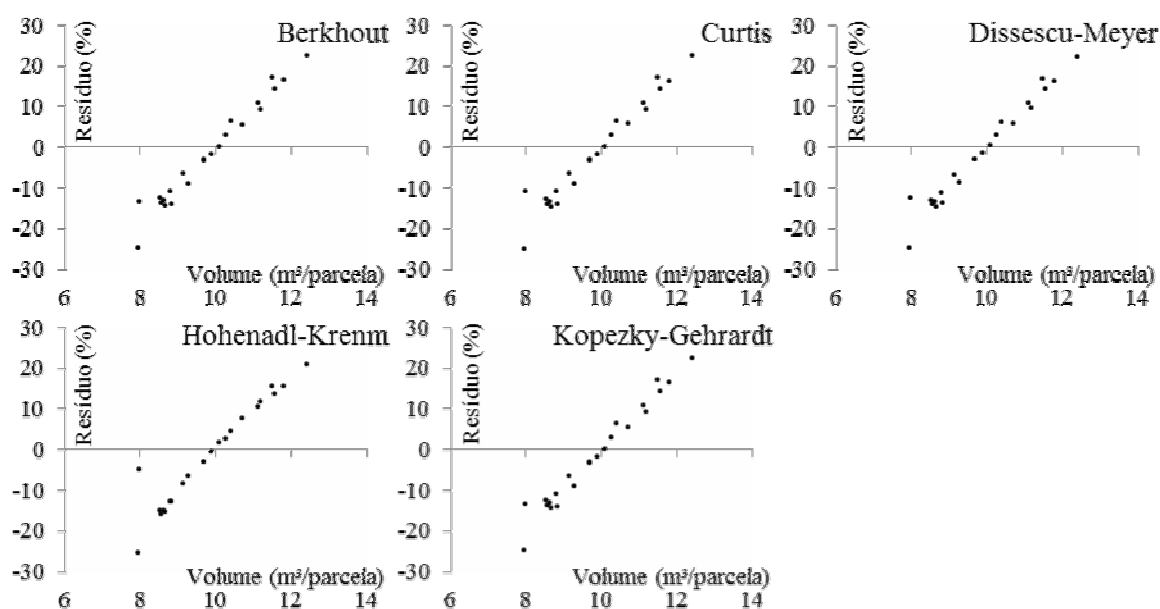


FIGURA 2. Dispersão dos resíduos para os modelos ajustados.

Com base nos gráficos de dispersão dos resíduos, é possível observar um padrão semelhante de distribuição residual para todos os modelos analisados. Todos eles superestimaram o volume das parcelas com até 10 m³ de volume de madeira e subestimaram o volume das parcelas com volume superior a 10 m³. Portanto, verifica-se que todos os modelos apresentaram falta de independência dos erros, não atendendo um dos pressupostos da análise de regressão, que é a independência dos erros.

Desta forma, com base no valor do coeficiente de determinação e no erro padrão da estimativa, o modelo que apresentou maior precisão em relação aos demais modelos foi o modelo de Berkhout. Apesar disso, entende-se que é necessário novos estudos buscando encontrar um modelo que apresente maior precisão.

Em estudo similar, BERRA et al. (2011) trabalharam com estimativa de volume florestal em *Eucalyptus* sp. a partir de imagens Landsat 5. Nesse caso, os autores conseguiram ajustar um modelo de regressão múltiplo (*stepwise*), resultando em um R^2 de 0,29 e erro padrão da estimativa de 39,04%. Tal resultado foi

justificado pelas características do povoamento florestal que apresentava várias espécies com diferentes idades e espaçamentos.

Mesmo diante das características mais homogêneas do povoamento florestal no presente estudo, foi possível obter com a equação ajustada de Berkhout uma estimativa do volume para todo o povoamento utilizando todos os *pixels* (1.288) da área de estudo. Assim, o valor total do volume de madeira estimado com base nessa equação foi de 28.555 m³. Em comparação, o volume total ficou compreendido exatamente entre o intervalo de confiança gerado pelo inventário florestal utilizando as 23 parcelas amostradas. Do mesmo modo, o intervalo de confiança encontrou valor médio de 28.628 m³, apenas 73 m³ (em 116 ha) a mais do que aquele estimado pela equação do NDVI.

Apesar do ajuste do modelo matemático não ter sido muito favorável sobre a precisão, a equação estimou muito bem o volume (m³) para todo o povoamento em relação ao método tradicional de inventário florestal.

Para a estimativa do volume utilizando a média do índice de vegetação como fator de correção do volume cilíndrico para o volume (m³) por parcela, utilizou-se as médias obtidas dos índices, sendo elas: EVI (0,482), EVI₂ (0,335), MSAVI₂ (0,716), NDVI (0,662), SAVI (0,348). Após estimativa com os fatores de correção, com exceção do volume do inventário florestal, oriundo do procedimento tradicional, obteve-se as médias do volume (m³/parcela), para as 23 parcelas, e seus valores são apresentados a seguir: Inventário Florestal (9,8561), EVI (10,5291), EVI₂ (7,3179), MSAVI₂ (14,4612), NDVI (15,6408), SAVI (7,6019).

O resultado do Teste *t*, ao nível de 5% de significância, realizado entre os fatores de correção e o volume do inventário (m³/parcela) nas 23 parcelas amostradas, foi significativo, ou seja, existe diferença entre os procedimentos e o método tradicional de inventário. A (Tabela 5) apresenta o resultado e os valores significativos para o Teste T.

TABELA 5. Valores significativos para o Teste *t* entre os fatores de correção e o volume (m³/parcela) do inventário florestal. Rio verde – GO.

Pares avaliados	Valor de <i>t</i> calculado	Probabilidade
VOL INV - EVI	-17,55	<0,001
VOL INV - EVI ₂	40,38	<0,001
VOL INV - MSAVI ₂	-31,39	<0,001
VOL INV - NDVI	-32,09	<0,001
VOL INV - SAVI	40,82	<0,001

VOL INV = Volume do inventário florestal.

Como pode ser observado na (Tabela 5), os procedimentos adotados não estimaram com precisão o volume por parcela, diferindo do inventário florestal tradicional. Tal fato pode ser explicado pela “aparência” da cobertura vegetal em um determinado produto de Sensoriamento Remoto, ser o resultado de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais. Assim, o que é efetivamente medido por um sensor remoto como resultado da reflectância de determinada vegetação, não pode ser explicado somente pelas características intrínsecas dessa vegetação, pois inclui também a interferência de vários outros parâmetros e fatores (PONZONI, 2001), como por exemplo: Fontes de radiação, que inclui a irradiância espectral, a localização do ângulo zenital e azimutal solar; Efeitos

da atmosfera; características do dossel; solos, devido uma série de propriedades e parâmetros.

Como a vegetação é um alvo muito complexo do sensoriamento remoto, pode apresentar variadas propriedades de reflexão foliar em uma mesma planta, além de assentar-se sobre um plano constituído de solo e substrato que, por sua vez, apresentam propriedades de reflexão própria (EIPHANIO et al., 1996), essas interferências limitaram as estimativas efetuadas utilizando os índices de vegetação como fator de correção do volume.

CONCLUSÕES

Apesar da baixa correlação entre os índices de vegetação e o volume derivado do inventário florestal, a utilização do índice NDVI como variável independente no modelo matemático pode ser considerada para tal fim, pois as estatísticas de precisão do modelo foram razoáveis.

Os índices de vegetação testados não estimaram com precisão o volume de madeira do povoamento florestal da área de estudo, revelado pela diferença significativa entre os procedimentos utilizados. Entretanto, os índices de vegetação podem apresentar, além das relações diretas com a vegetação, a possibilidade de obtenção do volume utilizando apenas o fator de correção, e isso diminuiria os custos do inventário florestal nos povoamentos florestais de eucalipto.

REFERÊNCIAS

BERRA, E. F.; PEREIRA, R. S.; BRANDELERO, C. **Estimativa de volume florestal com imagem Landsat 5**. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...**, 2011.

EIPHANIO, J. C. N.; GLERIANI, J. M.; FORMAGGIO, A. R.; RUDORFF, B. F.T. **Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

GUJARATI, D. N; PORTER, D.C. **Econometria Básica** / Damodar Gujarati; tradução de Maria José Cyhlar Monteiro. - Rio de Janeiro: Elsevier, 2011 – 5ª Edição.

KARNIELI, A. et al. **Temporal dynamics of soil and vegetation responses in a semi-arid environment**. International Journal of Remote Sensing, v. 23, n.19, p. 4073-4087, 2002.

LEAL, F. A. **Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume**. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Publicação PPGEFL.DM-190/2013. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília - UnB, Brasília/DF. 2013. 96p.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E.P.; MATRICARDI, E.A.T. **Mapeamento de unidades produtivas utilizando a interpolação geoespacial krigagem a partir do inventário florestal em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake**.

Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, vol.7,n.13, p. 727 a 745, 2011.

MATOS, O. C. de. **Econometria básica: Teoria e aplicações** / Orlando Carneiro de Matos. -3ª Edição revisada e ampliada. São Paulo : Editora Atlas, 2000.

PONZONI, F. J. **Comportamento Espectral da Vegetação**. In: MENESES, P.R., NETTO, J.S.M. (org) Sensoriamento remoto, reflectância dos alvos naturais. Brasília – DF: Editora Universidade de Brasília - UnB, Embrapa Cerrados, p 157-199, 2001.

SANQUETA. C. R.; WATZLAWICK, L. F.; DALLA CÔRTE, A. P.; FERNANDES, L. de A. V.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários florestais: Planejamento e Execução**. Carlos Roberto Sanqueta... [et al.] – 2. ed.- Curitiba : Multi-Graphic Gráfica e Editora, 2009. 316p.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F.J. **Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus spp.*** IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1998.

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