

YHASMIN GABRIEL PAIVA

**ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR MÉTODOS ÓTICOS E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA CALIBRAR MODELO
ECOFISIOLÓGICO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO EM ÁREAS DE
RELEVO ONDULADO**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação
em Meteorologia Agrícola, para obtenção
do título de *Magister Scientiae*

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P149
2009 Paiva, Yhasmin Gabriel, 1982-
Estimativa do índice de área foliar por métodos óticos e
sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico
em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado /
Yhasmin Gabriel Paiva. – Viçosa, MG, 2009.
xiv, 63f. : il. ; 29cm.

Orientador: Aristides Ribeiro.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Metereologia agrícola. 2. Análise foliar. 3.
Sensoriamento remoto. 4. Eucalipto - Crescimento -
Modelos matemáticos. 5. Eucalipto - Efeito da radiação
solar. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 630.2515

YHASMIN GABRIEL PAIVA

**ESTIMATIVA DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR MÉTODOS ÓTICOS E
SENSORIAMENTO REMOTO PARA CALIBRAR MODELO
ECOFISIOLÓGICO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO EM ÁREAS DE
RELEVO ONDULADO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 24 de julho de 2009.

Prof. José Eduardo de Macedo Pezzopane
(Co-orientador)

Prof. Sérgio Zolnier

Prof. Geraldo Gonçalves dos Reis

Prof. Maria das Graças Ferreira Reis

Aristides Ribeiro
(Orientador)

À minha querida mãe, Maria José de Paiva,

Meu exemplo de vida

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, amado da minh'alma, fonte suprema de amor.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, pela oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

A empresa CENIBRA pelo apoio irrestrito

Ao Professor Aristides Ribeiro pelos conhecimentos repassados e amizade.

Ao professor José Eduardo de Macedo Pezzopane pelos conselhos e ensinamentos.

Ao professor José Marinaldo Gleriani pelas valiosas ajudas e presteza.

Ao meu noivo Hugo, pelo amor, amizade e companheirismo.

À família pelo apoio.

Aos amigos: André, Larissa e Maristela pelo apoio fraterno.

Aos amigos do "SOPA": Aline, Antônio, Daniela, Fabio, Mariana, Mariano, Nilton, Robson, Ranieri, Raquel, Wellian

Aos amigos: Priscila, Rodrigo, Wedson, André, Elton, Carlos Alexandre, Thomé, Danilo, Nathalii

BIOGRAFIA

YHASMINE GABRIEL PAIVA, filha de Maria José de Paiva, natural de Belo Horizonte, Minas Gerais, nasceu no dia 10 de outubro de 1982. De 2004 ao ano de 2006 foi bolsista de iniciação científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Em agosto de 2007, graduou-se em Engenharia Florestal pela Universidade Federal do Espírito Santo. Em agosto de 2007, iniciou-se, o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, MG, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2009.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3

ESTIMATIVAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR (IAF) UTILIZANDO O LAI-2000 E FOTOGRAFIAS HEMISFÉRICAS EM PLANTIOS CLONAIIS DE EUCALIPTO

Resumo	4
Abstract	5
1. Introdução	5
2. Materiais e Métodos	8
3. Resultados e Discussão	11
4. Conclusões	16
5. Referências Bibliográficas	16

INFLUÊNCIA DO RELEVO NA PRODUTIVIDADE SIMULADA DO EUCALIPTO POR MEIO DE MODELO ECOFISIOLÓGICO: INTERAÇÃO IRRADIÂNCIA SOLAR E IAF

Resumo	20
Abstract	21
1. Introdução	22
2. Material e Métodos	24
3. Resultados e Discussões	28
4. Conclusões	34
5. Referências Bibliográficas	34

ESTIMATIVAS DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR MEIO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO: UMA METODOLOGIA PARA CALIBRAÇÃO DE MODELO ECOFISIOLÓGICO EM PLANTIOS DE EUCALIPTO

Resumo	38
Abstract	39
1. Introdução	40

2. Material e métodos.....	42
3. Resultados e Discussão.....	50
4. Conclusões.....	56
5. Referências Bibliográficas.....	57
CONCLUSÕES GERAIS.....	62

RESUMO

PAIVA, Yhasmin Gabriel, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009.
Estimativa do Índice de Área Foliar por métodos óticos e sensoriamento remoto para calibrar modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado. Orientador: Aristides Ribeiro, Co-Orientadores: José Marinaldo Gleriani e José Eduardo de Macedo Pezzopane.

Este trabalho teve por objetivo estimar o índice de área foliar (IAF) em plantios florestais de eucalipto, utilizando instrumentos óticos e imagens de satélite para se avaliar a resposta frente às condições físico-climáticas presentes na área de estudo e, a partir destes dados, calibrar e simular a produtividade por meio de um modelo ecofisiológico de crescimento. O estudo foi realizado em quatro talhões de plantios de eucalipto em duas diferentes idades presentes em duas regiões: Cocais, de maior altitude e Rio Doce, mais baixa, localizadas na bacia do Rio Doce, leste de Minas Gerais. Foram alocadas nove parcelas em cada talhão, considerando as faces de exposição do relevo. Os dados experimentais foram coletados em agosto de 2008 (período seco) e janeiro de 2009 (período chuvoso). Realizaram-se as estimativas do IAF por meio de medidas de índice de área de planta (IAP) pelos equipamentos LAI-2000 (LI-COR) e câmera com lentes hemisféricas. Adotou-se a expressão IAP visto que esses sensores não discernem unicamente o elemento foliar em suas medidas. Para verificar a exatidão das estimativas do IAF foi utilizado o método da análise destrutiva. Os dados meteorológicos foram adquiridos por meio de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada região do estudo. Executou-se o modelo 3PG (Physiological Principles in Predicting Growth) com parametrização realizada em trabalhos anteriores para as mesmas regiões. Foi realizada a calibração do 3PG com índices de vegetação (IV's) do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). A simulação do modelo foi realizada a partir da radiação global corrigida segundo a inclinação e a face de exposição do terreno. Verificou-se que o IAP obtido com LAI2000 foi o método indireto melhor correlacionado com o IAF observado. O eucalipto respondeu à sazonalidade climática, apresentando menores valores de IAF na época seca em relação à estação chuvosa. O rendimento dos talhões localizados nas maiores altitudes (Cocais) superou os talhões das altitudes mais baixas (Rio Doce) em IAF, provavelmente devido à maior demanda evapotranspirativa presente em Rio Doce. As faces de exposição norte apresentaram maior incidência de radiação solar de

acordo com a correção realizada para superfícies inclinadas. Nesta face, também, foram verificados maiores valores de IAF medidos a campo e estimados pelo modelo 3PG bem como para outras variáveis estimadas que expressam a produtividade do plantio. Os resultados para as áreas de relevo inclinado não são conclusivos, devendo ser realizados estudos para verificar se o padrão de resposta obtido se repete analisando a influência da latitude do local. O modelo 3PG calibrado pelo NDVI apresentou boas estimativas pontuais com os dados observados e temporais verificada pelos dados IV's-MODIS.

ABSTRACT

PAIVA, Yhasmin Gabriel, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2009. **Estimation of Leaf Area Index by optical methods and remote sensing to calibrate ecophysiological model for eucalypt plantations in hilly relief.** Adviser: Aristides Ribeiro, Co-Advisers: José Marinaldo Gleriani and José Eduardo de Macedo Pezzopane.

The purpose of this study was to estimate the leaf area index (LAI) in eucalyptus forest plantations, using optical instruments and satellite imagery to evaluate the response to the physical and climatic conditions of the study area, and based on these data, calibrate and simulate yields with an ecophysiological growth model. The study was conducted in four eucalyptus stands of two ages in the following two regions: Cocais, at a higher altitude and Rio Doce, at a lower altitude, in the Rio Doce basin, in eastern Minas Gerais. Nine plots were marked in each stand, according to the exposure of the relief surface. The experimental data were collected in August 2008 (dry season) and January 2009 (rainy season). The LAI was estimated by measures of the plant area index (PAI) by the equipment LAI-2000 (LI-COR) and hemispherical photographs. The expression PAI was adopted since these sensors do not measure only the leaf element. The method of destructive analysis was used to check the accuracy of the LAI estimates. Meteorological data were collected at two monitoring stations installed near the stands in each region of the study. The model 3PG (Physiological Principles in Predicting Growth) was run using the parameterization established in previous studies for the same regions. The 3PG was calibrated with vegetation indices (VIs) of the sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The model simulation was performed based on the corrected global radiation according to the slope and exposure of the relief surface. It was found that the PAI derived from LAI2000 was the indirect method that correlated best with the observed LAI. Eucalyptus responded to climatic seasonality, with lower LAI values in the dry than in the rainy season. The LAI, in the stands at higher altitudes (Cocais) exceeded that of the lower plots (Rio Doce), probably due to the higher evapotranspiration demand in the Rio Doce basin. The incidence of solar radiation on the northern slope surfaces was higher, in agreement with the correction performed for inclined surfaces. On this face, again, higher LAI values were measured in the field and estimated by the model 3PG well as for other estimated variables that express the crop productivity. The results for the inclined

areas were not conclusive. Studies should investigate whether the response pattern is repeated in analyses of the influence of the latitude of the site. The estimates of the model 3PG calibrated by the normalized difference vegetation index (NDVI) agreed well with the observed data and temporal data verified by MODIS-VI.

INTRODUÇÃO GERAL

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido por Watson (1947) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2). O IAF pode ser considerado uma variável-chave na compreensão da dinâmica da vegetação em ecossistemas terrestres, uma vez que é determinante em processos produtivos como a interceptação da radiação e trocas gasosas e de água com o meio, além de interferir em aspectos ecológicos importantes, como a competição inter e intra-específica entre plantas, a retenção de carbono e a conservação do solo e ser um componente dos ciclos biogeoquímicos em ecossistemas (Bréda, 2003).

Nas medições do IAF, têm-se os métodos diretos ou “destrutivos”. Estes são importantes para se ter uma medida real do dossel foliar a partir de uma amostragem representativa em função do tamanho e tipo de planta. É considerado um método padrão por diversos autores (Favarin *et al.*, 2002; Lima *et al.*, 2008), porém sua execução é pouco viável quando se deseja realizar uma grande amostragem em culturas florestais.

Os métodos indiretos realizam estimativas do IAF mantêm a integridade das árvores/folhas. Dentre os instrumentos utilizados para estas estimativas, têm-se aqueles que operam em princípios óticos que derivam de medidas por meio da fração de radiação transmitida dentro do dossel e baseiam-se em uma estatística de probabilidade de distribuição e arranjo dos elementos foliares no dossel (Jones, 1992). Medidas óticas não distinguem o tecido fotossinteticamente ativo, chamados de “elementos verdes”, de outros elementos da planta tais como galhos, ramos e troncos (Stenberg *et al.*, 2003 Dovey e du Toit, 2006). Assim, parece haver um consenso em adotar a expressão “Índice de Área das Plantas (IAP)”.

A influência do relevo pode modificar a disponibilidade de radiação de acordo com o grau de inclinação e face de exposição do terreno, provocando aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese, podendo ocorrer alterações no balanço de energia e, conseqüentemente, no microclima local (Pezzopane, 2001). A variação na intensidade e duração da radiação incidente, frente às condições de relevo, pode gerar distintas respostas do IAF do dossel, tornando importante essa quantificação.

Os modelos baseados em processos (MBP) simulam os padrões de crescimento das árvores em termos de mecanismos biofísicos o define em resposta às condições ambientais e praticas de manejo (Landsberg e Gower, 1997). O IAF é uma variável biofísica requerida em modelos de produção primaria e globais de clima, hidrologia, ecologia.

Os índices de vegetação (IV's), produtos de sensoriamento remoto, foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação aos solos. A importância dos IV's para mapear o IAF está nas estimativas da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos dosséis das plantas (Walter-Shea *et al.*, 1997) bem como da biomassa e percentagem de cobertura verde da superfície. Estas imagens são freqüentemente empregadas na estimativa não destrutiva da biomassa fotossinteticamente ativa (folhas) de várias formações vegetais (Boelman *et al.*, 2003; Foody *et al.*, 2001), com resultados promissores quando usados em superfície de energia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOELMAN, N. T.; STIEGLITZ, M. RUETH, H. M.; SOMMERKORN, M.; GRIFFIN K. L.; SHAVER, G. R. GAMON, J. A. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. **Oecologia**, v. 135, p. 414–421. 2003.

BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417. 2003.

FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A.; VILA NOVA, N. A.; FAVARIN, M. G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.769-73. 2002.

FOODY, G. M.; CUTLER, M. E.; MCMORROW, J.; PELZ, D.; TANGKI, H.; BOYD, D. S.; DOUGLAS, I. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. **Global Ecology & Biogeography**, v. 10, p. 379–387. 2001.

JONES, H. G. **Plant and microclimate**. 2nd edn. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1992.

LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management**. (pp. 354). San Diego, California: Academic Press. 1997.

LIMA, C. J.G.S; OLIVEIRA, F.A.; MEDEIROS, J.F.; OLIVEIRA, M. K. T; OLIVEIRA FILHO, A. F. Modelos matemáticos para estimativa de área foliar de feijão caupi. **Caatinga**, v.21, n.1, p.120-127. 2008.

PEZZOPANE, J.E.M. **Caracterização Microclimática, Ecofisiológica e Fitossociológica em uma Floresta Estacional Semidecidual Secundária, em Viçosa, MG**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 240f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

STENBERG, P., NILSON, T., SMOLANDER, S., VOIPIO, P., Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v 29, p.363–370. 2003.

WALTER-SHEA, E. A.; PRIVETTE, J.; CORNELL, D., MESARCH, M. A.; HAYS, C. J. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p.162-177. 1997.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76. 1947.

Estimativas do Índice de Área Foliar (IAF) utilizando o LAI-2000 e Fotografias Hemisféricas em plantios clonais de eucalipto

Estimates of Leaf Area Index (LAI) of clonal eucalyptus based on the LAI-2000 and hemispherical photographs

Yhasmin Gabriel Paiva

Aristides Ribeiro

José Marinaldo Gleriani

José Eduardo de Macedo Pezzopane

Resumo: O Índice de Área Foliar (IAF) é uma importante variável em modelos de produção florestais. No entanto, medições diretas contínuas do IAF por meio de métodos destrutivos envolvem uma grande quantidade de amostras, são trabalhosos e demandam tempo, sendo portanto os métodos indiretos uma alternativa viável. Parece haver um consenso em adotar a expressão índice de área de planta (IAP) para equipamentos com princípios óticos de estimativas de IAF por estes incluírem em suas leituras outra(o)s componentes do dossel (galhos, troncos) além de folhas. Este trabalho teve por objetivo estimar o IAF por métodos indiretos (LAI2000 e fotografias hemisféricas) em plantios clonais de eucalipto em dois distintos sítios físico-climáticos na bacia do Rio Doce – MG, em períodos secos e chuvosos. O estudo foi realizado em quatro talhões de plantios de eucalipto com idades de 32 e 58 meses localizados na bacia do Rio Doce, leste de Minas Gerais, nas regiões de Rio Doce e Cocais situadas em baixas e maiores altitudes respectivamente. Foram alocadas nove parcelas em cada talhão. Os dados experimentais foram coletados nos meses de agosto (2008) e janeiro (2009) representando os períodos mais secos e úmidos do ano. Realizaram-se as medições do IAP por meio dos equipamentos LAI-2000 e câmeras com lentes hemisféricas. Para verificar a exatidão da estimativa, realizou-se a análise destrutiva do IAF. Os dados meteorológicos foram adquiridos por meio de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada regional em estudo. As medidas de IAP pelo LAI-2000 foram melhores correlacionadas com o IAF observado ($r = 0,95$), apresentando menor erro de medição (RMSE = 0,23), embora as fotografias hemisféricas tenham apresentado bom potencial de uso. Verificou-se que o IAF dos talhões da região de Cocais, com maiores altitudes, superou os talhões de Rio Doce, esta tendência se repetiu nos IAP's medidos pelos métodos indiretos. A maior demanda evapotranspirativa em Rio Doce devido à maior disponibilidade energética presente pode ser um fator de importância na resposta do incremento foliar reduzido, observado neste sítio. Foi verificada a sazonalidade do IAF na análise destrutiva. Dentre os estimadores, encontrou-se que somente o LAI-2000 foi capaz de diferenciar ($p < 0,05$) a variação

do IAP medido na época chuvosa ($2,01 \pm 0,54$) em relação à época seca ($1,45 \pm 0,33$) em que a oferta hídrica e térmica são menores nos locais deste estudo.

Palavras Chave: IAF, métodos óticos, altitudes

Abstract: The Leaf Area Index (LAI) is an important variable estimated in models of forest production. However, continuous direct measurements of the LAI using destructive methods involve a large number of samples and are therefore usually not viable, so indirect methods are an alternative in this case. There seems to be a consensus on adopting the expression plant area index (PAI) for equipment with optical principles of LAI estimation, since other structures of the canopy (branches, trunks) apart from leaves are included in the readings. This study aimed to estimate LAI by indirect methods (canopy analyzer and hemispherical photographs) in clonal eucalyptus plantations at two physical and climatically different locations in the Rio Doce basin, state of Minas Gerais, in the dry and wet seasons. The study was conducted in the Rio Doce basin, in eastern Minas Gerais, in the regions of Rio Doce and of Cocais, at low and high altitude, respectively, in four 32 and 58 month-old eucalyptus stands. Nine plots were outlined in each stand. The experimental data were collected in August (2008) and January (2009), which are the wettest and driest periods of the year. The PAI was measured with a LAI-2000 (LI-COR) [canopy analyzer](#) and hemispherical photographs. The estimate accuracy was checked using a destructive LAI analysis. Meteorological data were collected at two weather stations in the surroundings of the stands under study. PAI measurements by LAI-2000 were better correlated with the observed LAI ($r = 0.95$), with a lower measurement error (RMSE = 0.23), and the potential of the hemispherical photographs seemed promising. It was found that the LAI of the stands of the region of Cocais, at a higher altitude, exceeded the plots of Rio Doce; this trend was repeated in the PAI measured by indirect methods. The higher evapotranspiration demand in Rio Doce due to higher energy availability may be a relevant factor in the response of reduced leaf growth at this site. The destructive analysis confirmed seasonality of the LAI. Of all estimators, only LAI-2000 was able to differentiate ($p < 0.05$) the variation of the PAI measured in the rainy season (2.01 ± 0.54) compared to the dry season (1.45 ± 0.33), when water and heat supply are lower at the sites of this study.

Key words: LAI, optical methods, altitudes

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* ocupa a maior superfície plantada no segmento florestal brasileiro com área de 3.751.867 ha (ABRAF, 2007). As florestas plantadas pelo setor de celulose e papel do Brasil são as mais produtivas do mundo (BRACELPA, 2008), sendo responsáveis por 29% da participação do consumo de madeira em toras (ABRAF, 2007). A alta produtividade alcançada é resultado de pesquisas em diversas áreas de importância como solos e nutrição, melhoramento genético,

climatologia, somada a alta tecnologia empregada nos tratos silviculturais e ao clima favorável.

A fixação de carbono pelas plantas depende da interceptação da radiação e sua conversão em energia química, portanto, o IAF pode ser considerado um parâmetro indicativo de produtividade de uma floresta (Favarin et al., 2002). Segundo Watson (1947), o Índice de Área Foliar (IAF) é a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2).

As variáveis meteorológicas atuam diretamente e indiretamente em distintos processos que envolvem o crescimento da planta e logo, na variação do IAF. A radiação é a fonte energética responsável pela excitação da clorofila na faixa espectral do visível (0,40 a 0,70 μm) que desencadeia na produção de carboidratos por meio da fotossíntese. A temperatura influencia vários processos fisiológicos, como a respiração, a transpiração, divisão celular, fotossíntese, podendo afetar o enraizamento das árvores (Cunha et al., 2009) e fases fenológicas como a senescência e emissão de novas folhas (Martins et al., 2007) e iniciação floral (Aguiar e Kageyama, 1987). A transpiração das plantas é função, sobretudo, do estoque de água disponível no solo regulando a abertura estomática e conseqüentemente, o processo de difusão do vapor de água entre a cavidade estomatal e a atmosfera (Carneiro et al., 2008a).

Métodos diretos ou “destrutivos” de medição do IAF são importantes para se ter uma medida real do dossel foliar a partir de uma amostragem representativa em função do tamanho e tipo de planta. Estes métodos são referência para a calibração ou desenvolvimento de métodos de estimativas do IAF (Bréda, 2003).

Medições do IAF são normalmente inviáveis em processos destrutivos, quando realizados em uma maior quantidade de árvores. Os métodos indiretos apresentam-se então como uma alternativa para esta estimativa. Estes métodos possibilitam de estimativas do IAF por meio da fração de radiação transmitida dentro do dossel e baseiam-se em uma estatística de probabilidade de distribuição e arranjo dos elementos foliares no dossel (Jones, 1992). Estimativas por meio de medidas óticas não distinguem os tecidos fotossinteticamente ativos, chamados de “elementos verdes”, de outros da planta tais como galhos, ramos e troncos (Stenberg et al., 2003 Dovey e du Toit, 2006). Assim, parece haver um consenso em adotar a expressão “Índice de Área das Plantas (IAP)”, sobretudo para a estimativa do IAF em culturas

arbóreas (Battaglia et al., 1998; Cherry et al., 1998; Kalácska et al., 2005; Arias et al., 2007; Rouspard et al., 2008; Cunningham et al., 2009).

Entre os analisadores de dossel existentes, o modelo LAI-2000 (Licor Inc., Nebraska) vem sendo amplamente empregado nas estimativas de IAF em plantios florestais (Urban et al., 2009; Davi et al., 2008) e, mais especificadamente, em eucaliptos (Barclay et al., 2000; Xavier et al., 2002; Monte et al., 2007). As medidas do IAP são obtidas a partir de medias simultâneas da interceptação da luz difusa em cinco distintos ângulos zenitais com a lente “olho de peixe” do sensor. A fração da luz incidente nos cinco ângulos é usada para o cálculo da área do dossel baseada em equações matemáticas (LI-COR, 1992). Este método envolve a relação entre a área foliar e a probabilidade da radiação presente ser transmitida ao longo do dossel. Para simplificar a estimativa do IAF pela fração da luz vinda da abertura do dossel, é assumido que o dossel é horizontalmente homogêneo (Chason et al., 1991).

A fotografia hemisférica é uma técnica para estudar os dosséis foliares via fotografias adquiridas de uma lente hemisférica (“fisheye”) abaixo da copa (orientada na direção do zênite). A fração de abertura do dossel é medida em múltiplos ângulos de visada em ordem analiticamente separada e quantificada em ângulo e área foliar. É uma alternativa econômica para esta estimativa, devido ao menor custo de aquisição do equipamento, podendo ser aplicada com sucesso em plantios de eucalipto (Macfarlane et al., 2007a; Macfarlane et al., 2007b).

A determinação do IAF é importante em estudos de nutrição, competição, relações solo-água-planta, acúmulo de matéria seca, produção, maturação e qualidade da cultura, dentre outros. É também um parâmetro chave para modelos globais e regionais da biosfera por expressar as trocas gasosas e energia da planta. É essencial a utilização desta variável como *input* em modelos que calculam a evapotranspiração (Soares, et al., 1997) e produtividade de florestas (Vargas et al. 2002; Stape et al., 2004; Rodríguez et al., 2009).

Pelo exposto, este trabalho teve por objetivo estimar o IAF por métodos indiretos (analisador de dossel e fotografias hemisféricas) em plantios clonais de eucalipto em dois distintos sítios físico-climáticos na bacia do Rio Doce – MG, em períodos secos e chuvosos.

2. Materiais e Métodos

O presente estudo foi realizado em plantios florestais clonais de eucalipto, pertencentes à empresa Celulose Nipo-brasileira S/A (CENIBRA), localizada na bacia do Rio Doce, a leste do Estado de Minas Gerais (MG). O clima da região é do tipo AW – Tropical Quente Semi-Úmido, segundo a classificação de Köppen, com um inverno seco marcado por baixos índices de precipitação.

As medições foram feitas em quatro talhões: Milagres e Sorós localizados na região do Rio Doce no município de Belo Oriente e Vai e Volta e Barrinhas localizados na região de Cocais que faz parte do município de Antônio Dias (Figura 1).

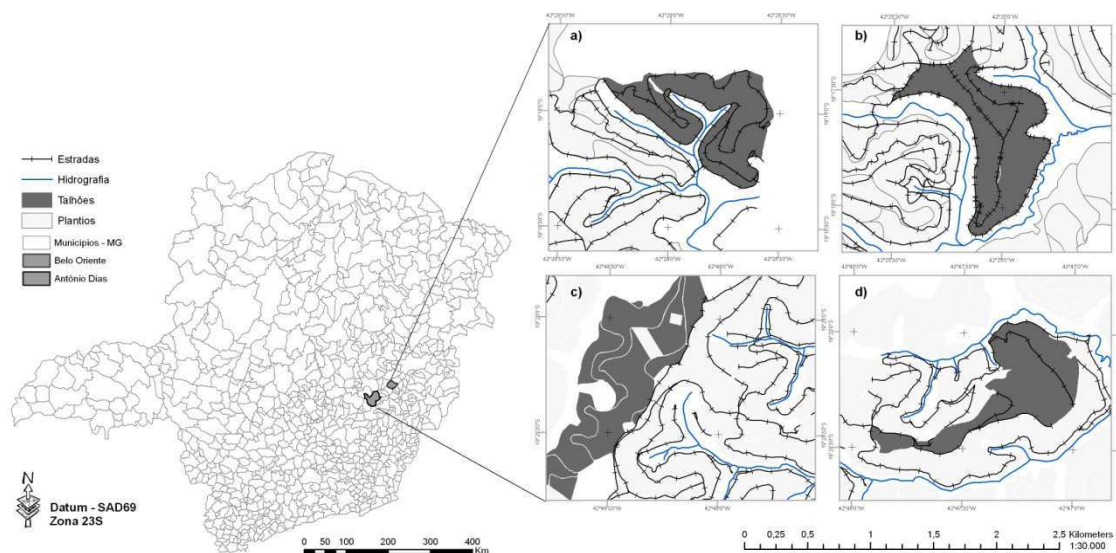


Figura 1. Localização dos talhões de plantio de eucalipto: Milagre (a) e Sorós (b) na região do Rio Doce (município de Belo Oriente) e Vai e Volta (c) e Barrinha (d) na região de Cocais (município de Antônio Dias).

A localização geográfica dos talhões, bem como a área e as características do plantio são apresentadas na Tabela 1. Visto que as duas regiões são de altitudes e condições edafo-climáticas distintas, não foi possível a padronização dos clones. Assim, escolheu-se trabalhar com aqueles que apresentaram maiores produtividades, segundo dados da empresa, representando o potencial das regiões. Para cada região, foram trabalhadas as áreas com o mesmo clone, duas idades distintas e espaçamentos de 3 x 3,33 m.

Tabela 1. Descrição dos talhões de plantio.

Regiões	Projeto	Área (ha)	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clone	Idade (meses)
Cocais	Barrinhas	30	19°17'59"S	42°28'41"O	1070	372	58
	Vai e Volta	74	19°28'13"	42°47'13"O	970	372	32
Rio Doce	Milagre	40	19°17'44"S	42°25'01"O	300	2719	58
	Sorós	77	19°28'16"S	42°48'23"O	250	2719	32

Foram alocadas nove parcelas fixas de 30 x 30 m ao longo de cada talhão totalizando 36 parcelas nas quatro áreas de estudo.

Procurando avaliar o comportamento sazonal dos clones, as coletas foram realizadas nos meses de: agosto (2008), representando a estação seca, e janeiro (2009), o período chuvoso.

Os dados meteorológicos foram obtidos por meio de estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada região em estudo. O período de dados foi correspondente ao início do ciclo de plantio até as idades presentes às datas de coletas.

Realizou-se a análise destrutiva para expressar o IAF observado nas duas épocas de coleta. Foram abatidas três árvores em duas parcelas por talhão. Para esta análise, elegeram-se as árvores que apresentaram características médias de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura, obtidos do inventário amostral.

O IAF de cada árvore foi obtido conforme metodologia adotada por Dovey e du Toit (2006). Foi realizado o abate da árvore para se obter o peso fresco total do dossel foliar. Posteriormente, retiradas amostras para determinação em laboratório da área foliar utilizando o equipamento LI-3000 (LICOR). Foram obtidos o peso úmido e a massa seca das folhas por meio de uma estufa de circulação forçada a 65°C. Dessa forma, a massa seca total de folhas coletadas em uma área conhecida de solo é convertida em IAF por meio da multiplicação do peso úmido e da massa seca da amostra.

Utilizou-se o analisador de dossel LAI-2000 (LI-COR) para a medição do IAP. Trabalhou-se no modo remoto de operação, com dois sensores óticos: uma unidade de controle fixa instalada em áreas a céu aberto e a outra unidade móvel em medições abaixo do dossel. Devido à inclinação da área de estudo foi utilizado o ângulo de abertura de 180°. Foram obtidas cinco medidas de IAP por parcela, sendo cada medida obtida a partir de cinco repetições longo de cada linha de plantio

(Figura 2). Procurou-se posicionar a direção do sensor de acordo com as condições topográficas da área de trabalho. Em locais planos, uma direção constante e nos inclinados, no sentido contrário ao aclave.

Para as medidas do IAP por meio das fotos hemisféricas foram usadas os seguintes equipamentos: câmera fotográfica Nikon; lente Nikon FC-E8 (Fish-Eye) com 180° de abertura; tripé com altura ajustada à 1,3 m do solo e nível de bolha. A abertura máxima da objetiva fotográfica foi escolhida para condições de pouca ou escassa luz como abaixo dos dosséis florestais; O modo contínuo de foco da câmera foi adotado para melhor captura do objeto em movimento, o que pode ocorrer no dossel pela ação dos ventos. As demais configurações da câmera foram ajustadas no modo automático.

Foram obtidas quatro imagens a partir da metade do ponto médio obtido das duas diagonais da parcela na posição da entrelinha do plantio (Figura 2). Trabalhou-se com dados médios por parcela do IAF estimado pelas fotografias hemisféricas.

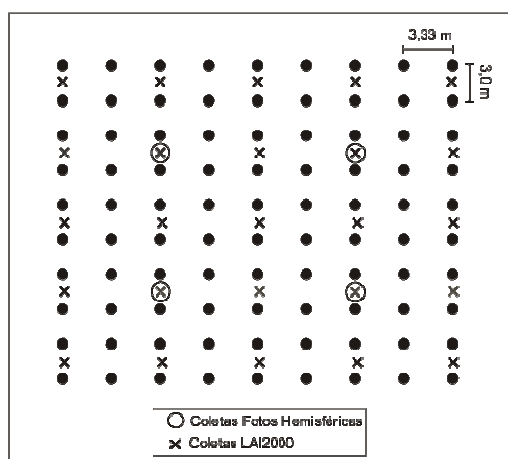


Figura 2. Esquema da coleta realizada por meio do sensor LAI-2000 e câmeras hemisféricas nas linhas e entrelinhas dos plantios de eucalipto.

As imagens foram processadas utilizando o *software* Hemisfer versão 1.4.2 (WSL Birmensdorf), desenvolvido para analisar dosséis a partir de imagens hemisféricas. Utilizaram-se os modelos desenvolvidos por Licor – LAI-2000 (2001) e Lang (1987), modelos 1 e 2 respectivamente, para a estimativa do IAP por meio da transmissão de luz nos anéis da lente em torno do zênite. Trabalhou-se no modo ajustado para a lente Nikon FC-08 em ângulo de 90° e função Gamma de 2,2 conforme adotado por Macfarlane et al., (2007c) em plantios de *Eucalyptus globulus*.

Para ambos os métodos indiretos de estimativa, as coletas a campo foram realizadas preferencialmente, sob radiação difusa, em condições de nebulosidade ou no princípio da manhã e final da tarde.

A exatidão das estimativas do IAF foi verificada por meio de medidas estatísticas de dispersão e resíduos utilizados para comparar os resultados dos métodos indiretos.

3. Resultados e Discussão

Analisando a Figura 3, nota-se que os dois sítios apresentam uma distribuição mensal de precipitação semelhante durante os meses do ano com totais de 1257 e 1215 mm respectivamente para Rio Doce e Cocais. Conforme esperado, a temperatura média apresenta-se maior na região de Rio Doce (Figura 3a) em comparação com a de maior altitude, (Figura 3b).

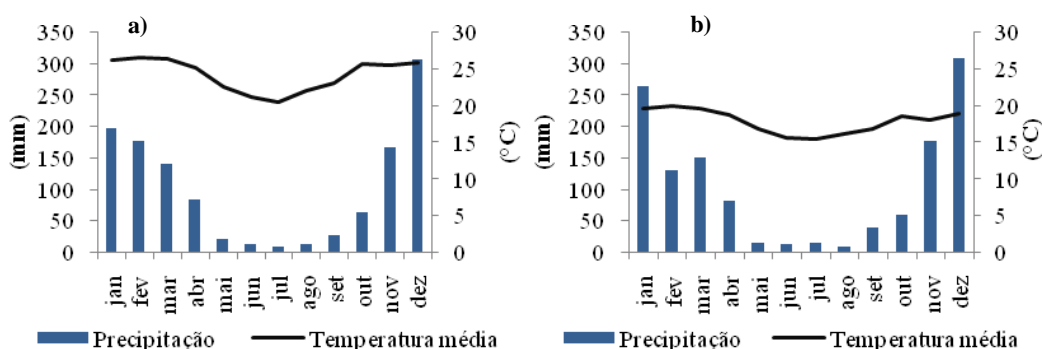


Figura 3. Caracterização climática do local: dados de Precipitação e Temperatura média mensal coletados nas estações meteorológicas em Rio Doce (a) e Cocais (b).

Verifica-se que as médias do IAP dos métodos indiretos seguem a mesma tendência do IAF, com maiores valores presentes em Cocais na idade de 32 meses (Tabela 2). Dovey e du Toit (2006) encontraram valores médios de IAP de 3,80 para estimativas de LAI-2000 em plantios de *Eucalyptus grandis* de três anos na África do Sul à 1260 m de altitude e espaçamento 2,44 x 2,44 m. Xavier et al., (2002) trabalhando com plantios clonais da mesma espécie no estado do Espírito Santo, verificaram utilizando este mesmo sensor, um IAP de 1,72 em plantios de idade de

60 meses e espaçamento de 3 x 3 m,. Estes resultados se aproximam dos valores encontrados neste estudo.

Os maiores coeficientes de variação do IAP são obtidos nos talhões mais velhos em Rio Doce (LAI-2000) e Cocais (fotos hemisféricas). Isto pode ser atribuído às maiores porcentagens de volume de tronco e galhos não diferenciados pelos sensores óticos, presentes nos povoamentos de maiores idades. A presença de locais declivosos nestes talhões pode ter contribuído para a menor homogeneidade dos dados de acordo com o grau de inclinação da parcela.

Tabela 2. Valores médios, desvios padrões e coeficientes de variação do IAF observado pelo método destrutivo e estimado pelo LAI-2000 e fotografias hemisféricas (modelo 1 – FH 1 e modelo 2 – FH 2) nas coletas realizadas nos talhões clonais de eucalipto em épocas secas e chuvosas.

Talhões	Métodos	Média	Desvio	C.V. (%)
32 (Cocais)	Destrutiva	3,03	0,66	21,70
	LAI-2000	2,48	0,61	24,72
	FH (1)	1,70	0,20	11,85
	FH (2)	1,67	0,17	10,28
58 (Cocais)	Destrutiva	1,85	0,58	31,52
	LAI-2000	1,98	0,59	29,76
	FH (1)	1,25	0,21	16,82
	FH (2)	1,17	0,19	16,17
32 (Rio Doce)	Destrutiva	1,19	0,47	39,42
	LAI-2000	1,56	0,49	31,27
	FH (1)	1,29	0,15	11,24
	FH (2)	1,24	0,13	10,82
58 (Rio Doce)	Destrutiva	1,69	0,30	17,67
	LAI-2000	1,20	0,44	37,19
	FH (1)	1,16	0,16	13,77
	FH (2)	1,13	0,14	12,28

Ao analisar a dispersão dos dados estimados na forma gráfica (Figura 4), é verificada uma maior variação nos valores do LAI-2000 em relação às fotos hemisféricas. Embora pareça desejável menor variabilidade entre os valores medidos, observa-se que os valores encontrados nas medidas do LAI-2000 se aproximam mais dos obtidos pelo método destrutivo, indicando ser este o método mais preciso em relação às fotos hemisféricas. São encontradas amplitudes de IAP (LAI-2000) de até 3,14 presentes no talhão de 32 meses em Cocais, enquanto as fotografias hemisféricas apresentam-se com medidas mais homogêneas, e um máximo de 0,9 e

0,82 de amplitude para os plantios de 58 meses em Cocais no modelo 1 e 2 respectivamente.

Dentre os dois modelos utilizados para a estimativa do IAF por fotos hemisféricas, tem-se uma variação não significativa ($p < 0,05\%$) entre ambos (Figura 4c, d), sendo que os valores médios do primeiro são ligeiramente superiores.

A dispersão pode ser ainda verificada analisando os quartis em cada método. A maior variação é apresentada pelos dados de IAF dado pelo método destrutivo e IAP pelo LAI-2000. No talhão de 58 meses em Cocais, por exemplo, os valores se concentram em uma faixa maior do primeiro ao terceiro quartil, onde se encontram de 25% a 75% do total de dados amostrados, respectivamente, quando comparado aos quartis das fotos hemisféricas.

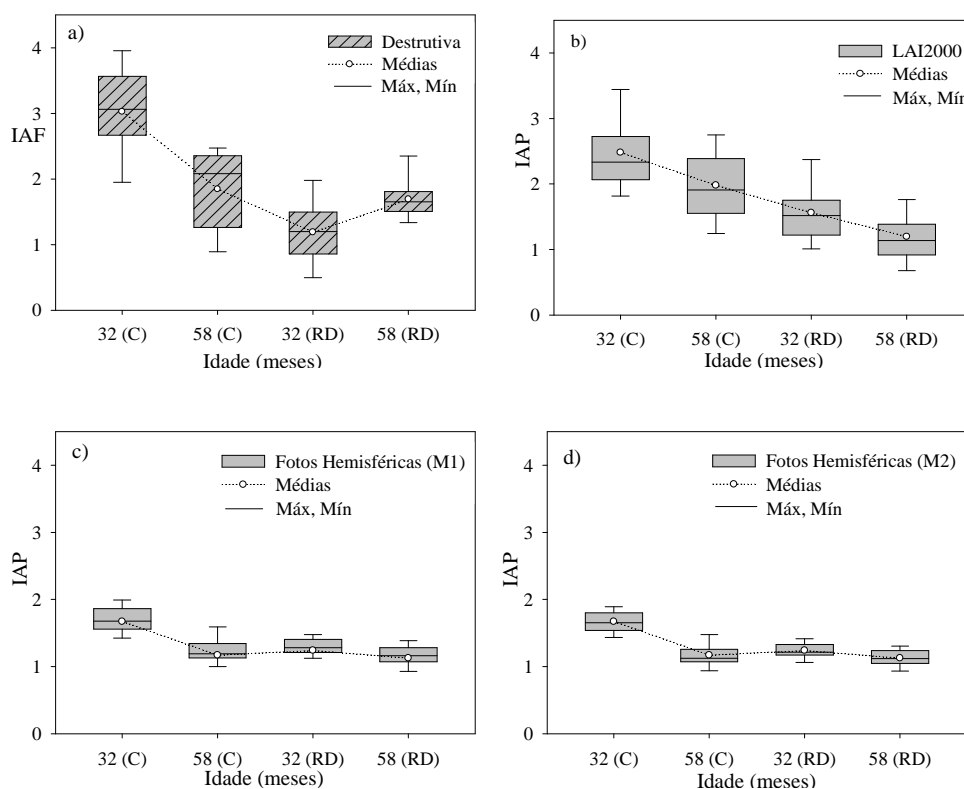


Figura 4. Valores médios, máximos, mínimos e os quartis amostrados para as medições do IAF (a) e do IAP (b, c, d) do IAF nas regionais de Rio Doce (RD) e Cocais (C).

De maneira geral, nas duas idades analisadas, foi verificado para os dois sítios maiores médias de estimativas de IAF para 32 meses. O incremento do IAF tem um comportamento exponencial nas idades mais jovens até atingir um ponto máximo em que se estabiliza com o aumento da idade, conforme apresentado por Almeida e

Soares (2003). Estes autores encontraram um valor máximo de 3,5 de IAF entre 3 e 4 anos de plantio de *E. grandis* no Espírito Santo (Brasil). Beadle e Turnbull (1992) concluíram a partir de diversos estudos avaliando o IAF máximo em plantios de eucalipto na Austrália, que este se estabiliza entre os valores de 4 e 6. Battaglia et al., (1998) compilaram medidas em um grande número de sítios em Victoria, Tasmania e oeste da Austrália incluindo áreas com irrigação, e verificou que o IAF varia entre 3 e 6 para *E. nitens* e *E. globulus* respectivamente.

Os métodos indiretos apresentaram de uma maneira geral menores valores em relação ao IAF medido com subestimativas de 2 a 49% por talhão. Macfarlane et al. (2007a), trabalhando com estes instrumentos óticos, encontraram uma variação de estimativas do IAF inferiores a 55% em plantios de *E. globulus*. Breda (2003) supõe que a razão desta subestimativa pode estar na distribuição não aleatória dos elementos foliares dentro do dossel. Dovey e du Toit (2006) citam que além deste fator, a distribuição angular da inserção das folhas e a distribuição horizontal homogênea das folhas no dossel também podem contribuir para estes resultados. Deve-se ressaltar que em algumas parcelas de medição aos 32 meses de Cocais, observou-se o não fechamento do dossel, o que leva a estimativas inferiores do IAF.

Na análise realizada por talhão (Tabela 2), verifica-se que o LAI-2000 foi o método indireto melhor correlacionado com o IAF (destrutivo), com menor erro encontrado (RME = 0,23) e coeficientes angular próximo a um e linear a zero. Entre os modelos de fotos hemisféricas, tem-se que o modelo de Lang, (1987) (M1) apresentou-se melhor correlacionado ($r = 0,87$) embora esta seja similar ($r = 0,81$) ao modelo da Licor (2000) (M2). Estes resultados superam os encontrados por Macfarlane et al., (2007a) que observaram maiores erros quadráticos em análise por talhão (RMSE = 1,6) em nove talhões avaliados nos plantios de *E. globulus*. Estes mesmos autores encontram uma correlação pobre com as fotos hemisféricas.

A correlação estabelecida entre as medidas de IAP por parcelas foi satisfatória, considerando a amostragem superior ($n = 72$).

Tabela 2. Exatidão das estimativas do IAF por métodos indiretos em valores médios por talhão e parcelas individuais nos dois períodos de coleta.

	n	r	RMSE	Equação
IAF X IAF (LAI-2000)*	8	0,95	0,23	$y = 0,868x + 0,004$
IAF X IAF (FH/M1)*	8	0,81	0,55	$y = 0,220x + 0,940$
IAF X IAF (FH/M2)*	8	0,87	0,57	$y = 0,243x + 0,841$
IAP (LAI-2000) X IAP (FH/M1)**	72	0,70	1,42	$y = 0,27x + 0,87$
IAP (LAI-2000) X IAP (FH/M2)**	72	0,66	1,50	$y = 0,257x + 0,842$

* Valores médios/Talhão ** Valores médios/Parcelas

Verifica-se que apenas o LAI-2000 diferiu significativamente ($p < 0,05$) a variação observada no IAF para as duas épocas de coletas. As coletas realizadas no período seco apresentaram, de uma maneira geral, menores valores médios ($1,45 \pm 0,33$) em relação à época chuvosa ($2,01 \pm 0,54$). Este comportamento é verificado graficamente na Figura 5 onde também são evidenciadas menores variações para as fotografias hemisféricas em ambas as regiões estudadas, indicando a pouca eficiência deste método para detectar a variação sazonal do IAF.

A transpiração, processo fisiológico em que ocorrem as trocas gasosas da planta, depende substancialmente da disponibilidade de água, que em última instância controla a condutância estomática visto que o potencial de água na folha reflete uma condição de equilíbrio entre a folha e o solo (Soares et al., 1997). Tatagiba et al. (2007), observaram redução da condutância estomática e da fotossíntese em clones de *E. grandis* na época seca comparado à chuvosa em todos os horários ao longo do dia.

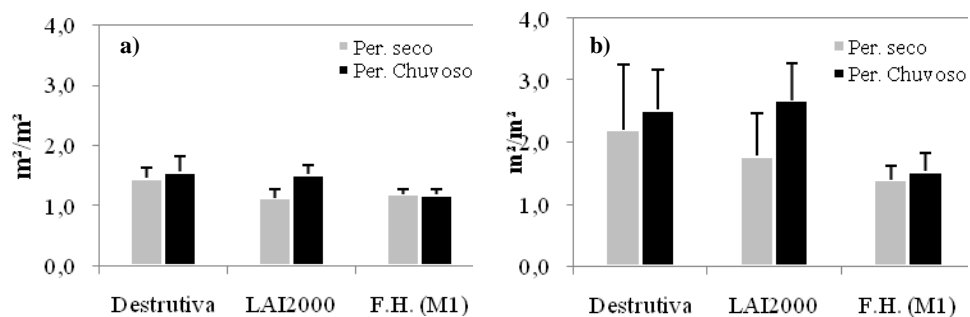


Figura 5. Médias dos dados medidos (destrutiva) e estimados (LAI-2000 e Fotografia Hemisférica- FH) de IAF nos períodos secos e chuvosos nas regiões de Rio Doce (a) e Cocais (b).

Analisando ainda a resposta do IAF nos sítios, verifica-se que os talhões de Cocais superaram os de Rio Doce em incremento foliar. O ganho no balanço de carbono dos plantios de Cocais resulta em maior alocação de assimilados para a

planta e menores perdas de CO₂ via respiração, como consequência das menores temperaturas observadas neste sítio.

A maior disponibilidade energética verificada em Cocais gera maior demanda evapotranspirativa neste sítio, visto que as duas regiões possuem totais anuais e a distribuição mensais de precipitação semelhantes. Souza et al., (2006), estudando as mesmas regionais, encontraram correlações entre a condutância estomática e o déficit de pressão de vapor (DPV) com menores valores de condutância em Cocais onde o DPV foi maior. Este resultado sugere uma menor abertura estomática e logo, uma diminuição da produtividade devido à redução das trocas gasosas.

4. Conclusões

Dos métodos indiretos utilizados para a estimativa do IAF, o LAI-2000 se apresentou melhor correlação com os dados obtidos da análise destrutiva. As fotografias hemisféricas obtiveram bons resultados indicando uso potencial nestas estimativas.

O IAF mostrou menores valores na época seca do ano, nas idades e sítios estudados. Esta resposta também foi verificada para o IAP mensurado pelos métodos indiretos, indicando boas estimativas.

Verificou-se que o IAF dos talhões de Cocais superou os talhões de Rio Doce. A maior demanda evapotranspirativa em Cocais devido à maior disponibilidade energética presente pode ter condicionado o incremento foliar reduzido, observado nesta região.

5. Referências Bibliográficas

ABRAF – Associação Brasileira Florestal. **Anuário Estatístico da ABRAF 2008** - Ano Base 2007. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/>. Acesso em: 15/12/2008.

AGUIAR, I. B.; KAGEYAMA, P. Y. Desenvolvimento floral de *Eucalyptus grandis Hill ex Maiden* em Mogi Guaçu – SP. Série técnica do Instituto de Pesquisas Florestais (IPEF). n.37, p.5-11,1987

ALMEIDA, A.C.; SOARES, J.V. Comparação entre o uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, p.159-170, 2003.

ARIAS, D.; CALVO-ALVARADO, J.; DOHRENBUSCH, A. Calibration of LAI-2000 to estimate leaf area index (LAI) and assessment of its relationship with stand productivity in six native and introduced tree species in Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 247, p.185–193, 2007.

BARCLAY, H. J.; TROFYMOW J. A.; LEACH R. I. Assessing bias from boles in calculating leaf area index in immature Douglas-fir with the LI-COR canopy analyzer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 100, p. 255-260, 2000.

BATTAGLIA, M.; CHERRY, M. L.; BEADLE, C. L.; SANDS, P. J.; HINGSTON, A. Prediction of leaf area index in eucalypt plantations: effects of water stress and temperature. **Tree Physiology**, v.18, p. 521–528, 1998.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Setor de celulose e papel do Brasil é referência mundial. Disponível em:**
<http://www.bracelpa.org.br/bra/index.html>. Acesso em: 15/12/2008.

BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.

CARNEIRO, R. L. C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C. A. M.; LEITE, F. P.; SEDIYAMA, G. C.; BARROS, N. F. Consumo de água em plantios de eucalipto - Parte 1: Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigados e não irrigados. **Revista Árvore**, v. 32, p. 1-10, 2008a.

CHASON, J.; BALDOCCHI, D.; HUTSON, M. A comparison of direct and indirect methods for estimating forest leaf area. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.57, p.107-128,1991.

CHERRY, M.; HINGSTON, A.; BATTAGLIA, M; BEADLE, C. Calibrating the LI-COR LAI-2000 for estimating leaf area index in the eucalypt plantations. **Tasforests**, v. 82, p. 75–82, 1998.

CUNHA, A, C, M, C. M.; PAIVA, H. N.; LEITE, H. G. BARROS, N. F.; LEITE, F. P.. Relações entre variáveis climáticas com produção e enraizamento de miniestacas de eucalipto. **Revista Árvore**, v.33, n.2, p.195-203. 2009.

CUNNINGHAM, S. C.; MAC NALLY, R.; READ, J.; BAKER, P. J.; WHITE, M.; THOMSON, J. R.; GRIFFIOEN, P. A. robust Technique for mapping vegetation condition across a major river system. **Ecosystems**, v. 12, p. 207–219, 2009.

DAVI, H.; BARET, R.; DUFRÊNE, E. Effect of thinning on LAI variance in heterogeneous forests. **Forest Ecology and Management**, v. 256, p. 890–899, 2008.

- DOVEY, S. B.; DU TOIT, B. Calibration of LAI-2000 canopy analyser with leaf area index in a young eucalypt stand. **Trees**, v. 20, p. 273–277, 2006.
- FAVARIN, J. L.; DOURADO NETO, D.; GARCIA Y GARCIA, A.; VILA NOVA, N. A.; FAVARIN, M. da G. G. V. Equações para a estimativa do índice de área foliar do cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.6, p.769-773, 2002.
- JONES, H. G. **Plant and microclimate**. 2nd edn. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1992.
- KALA'CSKA, M.; CALVO-ALVARADO, J.; SA'NCHEZ-AZOFEIFA, G. A. Calibration and assessment of seasonal changes in leaf area index in a tropical dry forest in different states of succession. **Tree Physiology**, v.25,p. 733–744, 2005.
- LANG, A.R.G. Simplified estimate of leaf area index from transmittance of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.41, p.179-186,1987.
- LI-COR. **LAI-2000 Plant canopy analyser: instruction manual**. Ed I LI-COR, Lincoln, Nebraska. 1992.
- MACFARLANE, C.; HOFFMAN, MEGAN.; EAMUS, D.; KERP, N.; HIGGINSON, S.; MCMURTRIE, R.; ADAMS, M.A. Estimation of leaf area index in eucalypt forest using digital photography. **Forest Ecology and Management**, v. 143, p. 176–188, 2007a.
- MACFARLANE, C.; GRIGG, A.; EVANGELISTA, C. Estimating forest leaf area using cover and fullframe fisheye photography: Thinking inside the circle. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 146, p. 1–12, 2007b.
- MACFARLANE, C.; ARNDT, S. K.; LIVESLEY, S. J.; EDGAR, A. C.; WHITE, D. A.; ADAMS, M.A.; EAMUS, D. Estimation of leaf area index in eucalypt forest with vertical foliage, using cover and fullframe fisheye photography. **Forest Ecology and Management**, V. 242. p.756–763. 2007c.
- MARTINS, F. B.; SILVA, J. C.; STRECK, N. A. Estimativa da temperatura-base para emissão de folhas e do filocrono em duas espécies de eucalipto na fase de muda. **Revista Árvore**, v.31, n.3, p.373-381, 2007.
- MONTE, M. A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G. ; LEITE, H. G. STOCKS, J. J. Métodos indiretos de estimação da cobertura de dossel em povoamentos de clone de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.769-775, 2007.
- RODRÍGUEZ, R.; REAL, P.; ESPINOSA, M.; PERRY, D. A. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, v. 82, n.2, p.149-162, 2009.
- ROUPSARD, O; DAUZAT, J.; NOUVELLON, Y.; DEVEAU, A.; FEINTRENIE, L.; SAINT-ANDRE, L.; MIALET-SERRA, I.; BRACONNIER, S.; BONNEFOND, J.; BERBIGIER, P.; EPRON, D.; JOURDAN, C.; NAVARRO, M.; BOUILLET, J.

Cross-validating Sun-shade and 3D models of light absorption by a tree-crop canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.148, p.549–564, 2008.

SOARES, J. V. ; ALMEIDA, A. C. de ; PENCHEL, R. M. . Balanço hídrico de plantações de eucalipto a partir da estimativa de transpiração pelo método de Penman-Monteith (Hydrological balance of eucalypt plantations through transpiration by the method of Penman-Monteith). **In: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts**, 1997, Salvador, Ba. Proceedings of IUFRO Conference on Silviculture and Improvement of Eucalypts. Colombo : Centro Nacional de Pesquisas de Florestas - CNPF/EMBRAPA, v. 4, p. 52-61, 1997.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P. ; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.399-410, 2006.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 219–234, 2004.

STENBERG, P.; NILSON, T.; SMOLANDER, S.; VOIPIO, P. Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v 29, p.363–370. 2003.

TATAGIBA, S.D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F.; DARDENGO, M.C. J. D.; EFFGEN, T.A.M. Comportamento fisiológico de dois clones de *Eucalyptus* na época seca e chuvosa. **Cerne**, v. 13, n. 2, p. 149-159, 2007.

URBAN, J.; TATARINOV, F.; NADEZHINA, N.; CERMÁK, J.; CEULEMANS, E. Crown structure and leaf area of the understorey species *Prunus serotina*. **Trees**, v. 23, p.391–399, 2009.

VARGAS, L. A.; ANDERSEN, M.N.; JENSEN, C.R.; JORGENSEN, U. Estimation of leaf area index, light interception and biomass accumulation of *Miscanthus sinensis* ‘Goliath’ from radiation measurements. **Biomass and Bioenergy**, v. 22, p.1–14, 2002.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76, 1947.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A.C. Variação do Índice de Área Foliar em clones de Eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.421-427, 2002.

Influência do relevo na produtividade simulada do eucalipto por meio de modelo ecofisiológico: interação irradiância solar e IAF

Influence of relief on eucalyptus productivity simulated by an ecophysiological model: interaction of solar radiation and LAI

Yhasmin Gabriel Paiva

Aristides Ribeiro

José Marinaldo Gleriani

José Eduardo de Macedo Pezzopane

Resumo: A radiação solar tem um importante papel na distribuição, composição e produtividade florestal. A influência do relevo pode modificar o regime de radiação de acordo com a face de exposição e o grau de inclinação do terreno, promovendo aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese vegetal. A variação na intensidade e duração da radiação incidente, frente às condições de relevo pode gerar distintas respostas do índice de área foliar (IAF), um importante parâmetro da estrutura do dossel da planta, tornando importante sua quantificação. Previsões com exatidão no crescimento do plantio são importantes para estimar o potencial do rendimento dos produtos da madeira e também investigar os efeitos do ambiente nos povoamentos florestais. Pelo exposto, este trabalho teve por objetivo verificar as diferenças da intensidade da radiação frente às condições de declividade e faces de exposição do relevo e quantificar as variações impostas pela fisiografia na produtividade de florestas de eucalipto em duas regiões na Bacia do Rio Doce, MG, por meio do modelo mecanístico 3PG. Trabalhou-se em dois talhões com idades de 32 meses em distintos sítios climáticos. Em cada talhão foram alocadas duas parcelas fixas de 30 x 30 m em locais com a face de exposição voltada para a posição Norte e Sul sendo realizada a padronização do tipo de solo. Os dados meteorológicos foram obtidos de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada uma das regionais de estudo. Foi realizada a correção da radiação global para superfícies inclinadas. Realizaram-se as estimativas do IAF por meio do equipamento LAI-2000 (LI-COR) em coletas realizadas no mês de janeiro de 2009. Utilizou-se o modelo 3PG com parametrização já realizada em estudos anteriores na região de estudo. Verificou-se que na maior parte do ano, as faces nortes apresentaram maior radiação solar incidente de acordo com a correção realizada para superfícies inclinadas com até 22% de incremento da radiação solar no mês de junho. Foram encontrados maiores valores medidos de IAF pelo sensor LAI2000 e de IAF estimados pelo modelo 3PG na face de exposição norte, embora somente uma região tenha apresentado variação significativa do IAF ($P < 0,05$). As simulações realizadas pelo modelo 3PG corroboram com os dados observados a campo em que a produtividade é maior em Rio Doce na idade trabalhada. Verificou-se que na face

Sul o modelo estimou maiores perdas, sobretudo do volume por hectare em Rio Doce e Cocais relação à face norte de 8,27 e 7,8 m³/ha⁻¹. ano respectivamente.

Palavras Chave: Faces de exposição, 3PG, radiação global.

Abstract: Solar radiation plays an important role in forest distribution, composition and productivity. The influence of topography can modify the radiation regime according to the surface inclination and slope degree, resulting in more or less energy available for plant biosynthesis. The quantification of incident radiation is essential, since it varies in intensity and duration, due to the relief conditions, resulting in different responses of leaf area index (LAI), an important parameter of the plant canopy structure. Accurate predictions of the plantation growth are important to estimate the potential yield of timber products and also investigate environmental effects on the forest. The purpose of this study was to investigate the differences in radiation intensity according to slope conditions and exposure of the relief surfaces and quantify the changes caused by physiography in productivity of eucalyptus forests in two regions in the Rio Doce basin, state of Minas Gerais, through the mechanistic model 3PG. Two 32-month-old plots were used at sites with different climate, after standardize the same soil type, two fixed 30 x 30 m plots were marked in each stand at places where the slope aspect north and south. Meteorological data were obtained from two weater stations installed near the areas of the stands. The global radiation was corrected for inclined surfaces. The LAI of samples collected in January 2009 was estimated by the LAI-2000 (LI-COR) canopy analyzer. The 3PG model parameterized in previous studies for the region of study was used. It was found that during most of the year, the north-facing slopes received more solar radiation according to the correction performed for inclined surfaces, with increases of up to 22% solar radiation in the month of June. Highest LAI values were measured by the LAI2000 sensor and highest LAI estimated by the model 3PG for the north-facing slopes, although the variation was significant in only one region for PAI (P <0.05). The simulations by the model 3PG confirmed the data observed in the field where productivity is higher in Rio Doce for the age considered. It was found that the model estimated higher losses for South-facing slopes, particularly for volume per hectare in Rio Doce and Cocais, compared to the north-facing slopes with 8.27 and 7.8 m³/ha⁻¹ years, respectively.

Key words: exposure surfaces, LAI, global radiation

1. Introdução

A radiação solar tem um importante papel na distribuição, composição e produtividade florestal (Gates, 1980), sendo o espectro fotossinteticamente ativo, responsável pela excitação das moléculas de clorofila, fornecendo energia para o processo fotossintético.

O relevo pode modificar o regime de radiação de acordo com a face de exposição e o grau de inclinação do terreno, promovendo aumento ou diminuição da energia disponível para a biossíntese, podendo ocorrer alterações no balanço de energia e, conseqüentemente, no microclima local (Pezzopane, 2001). Poucos são os trabalhos que consideram que o relevo pode acarretar erros de estimativas no saldo de radiação solar (Facco et al., 2009; Mefti et al., 2003).

Um aspecto relevante para as plantas é a variação da fração da radiação solar global com a partição em direta e difusa em relação a inclinação da superfície (Poulson e Platt, 1989; Ritter et al., 2005). A componente direta depende, principalmente, das condições de céu limpo, localização geográfica da superfície de incidência dos raios solares, ângulo de incidência dos raios solares (Iqbal, 1983). A difusa é mais aproveitada pelas folhas em razão de seu caráter multidirecional (Pezzopane, 2001), por permitir maior absorção pelo dossel. Esta é uma diferença substancial na densidade do fluxo dos fótons e a reação de diferentes espécies de plantas a combinações de ambos componentes é significativa (Larcher, 2004).

As influências topográficas são reconhecidas na composição florística, ou seja, na distribuição das espécies (Souza et al., 2003; Carvalho et al., 2005), estabelecimento da planta (Busby e Motzkin, 2009), produtividade (Souza, et al. 2006) e risco de incêndios florestais (Vadrevu, 2008; Sherman et al., 2008).

Sariyildiz e Kucuk (2005) mostraram que a face de exposição e a declividade do terreno afetam a química do solo, a qualidade da serrapilheira e a ciclagem de nutrientes. Com base nas diferenças encontradas nos solos examinados na face Norte e Sul, Sidari et al., (2008) sugerem que a face influencia significativamente as variáveis microclimáticas, o conteúdo de argila, a matéria orgânica e atividades das enzimas, fatores responsáveis pela fertilidade do solo.

O índice de área foliar (IAF) é definido por Watson (1947) como a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo. A variação na

intensidade e duração da radiação incidente, frente às condições de relevo abordadas, pode gerar distintas respostas do IAF do dossel, tornando importante essa quantificação. A planta deve ser eficiente na captação da radiação, o que depende da arquitetura do dossel, sendo o IAF um parâmetro para avaliar esse potencial de uso da energia fotossintetizante.

A incorporação de biomassa pela planta depende da integração das respostas das folhas e da distribuição da radiação nestes elementos. Por esta razão, a irradiação global é uma variável climática de grande importância em modelos de produtividade florestal, ecológicos e hidrológicos.

Previsões com exatidão no crescimento do plantio são importantes para estimar o potencial do rendimento dos produtos da madeira e também investigar os efeitos do ambiente nos plantios. Os modelos baseados em processos (MBP) simulam os padrões de crescimento das árvores em termos de mecanismos biofísicos em resposta às condições ambientais e práticas de manejo (Landsberg e Gower, 1997). Eles podem prever com boa acurácia as estimativas da taxa de crescimento, em curta rotação, quantificar a influência do clima na produtividade e estimar o potencial produtivo nas áreas onde os plantios florestais ainda não estão bem desenvolvidos (Almeida et al., 2004).

O modelo 3PG (Physiological Principles in Predicting Growth) desenvolvido por Landsberg e Waring (1997) é um MBP que requer poucos parâmetros e dados de entrada com certa facilidade de aquisição. O modelo estima a produtividade florestal baseando-se essencialmente na quantidade de energia radiante que é absorvida pelo dossel, convertida em carboidratos e alocada nos diferentes componentes da árvore como folhas, lenho e raízes. É um modelo generalizado para povoamentos não específicos aplicáveis para plantios de florestas homogêneas, dentre elas os plantios de eucalipto (White et al., 2000; Stape et al., 2004; Paul et al., 2007; Rodríguez et al., 2009; Miehle et al., 2009).

Este trabalho teve por objetivo verificar as diferenças da intensidade da radiação frente às condições de declividade e faces de exposição do relevo e quantificar as variações impostas pela fisiografia no IAF e produtividade de florestas de eucalipto, por meio do modelo mecanístico 3PG, em duas regiões na Bacia do Rio Doce, MG,

2. Material e Métodos

1.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado em plantios florestais clonais de eucalipto pertencentes à empresa Celulose Nipo-brasileira S/A (CENIBRA), localizada na bacia do Rio Doce, a leste do Estado de Minas Gerais (MG). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região enquadra-se no tipo AW – Tropical Quente Semi-Úmido, com um inverno seco marcado por baixos índices de precipitação.

O primeiro sítio se localiza na região de Cocais no município de Antônio Dias. Neste sítio se encontra o talhão com idade de 32 meses e área de 30 ha. Trabalhou-se com o clone 372 que apresenta grande produtividade e adaptação às condições edafoclimáticas do local.

O outro sítio de estudo se encontra na regional do Rio Doce no município de Belo Oriente. O talhão possui área de 77 ha e 32 meses de idade. A escolha do clone 372 foi feita pelos mesmos motivos já mencionados para o primeiro sítio.

Em cada um dos dois talhões, foram alocadas duas parcelas fixas de 30 x 30 m em locais inclinados com a face de exposição norte e sul do relevo. A padronização dos tipos de solos das parcelas foi realizada, estando presentes nos dois plantios solos do tipo latossolos amarelos.

1.2. Dados Meteorológicos

Os dados meteorológicos foram obtidos de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada uma das regionais de estudo. Os sensores foram calibrados de acordo com as condições climáticas presentes em cada região. Trabalhou-se com médias mensais calculadas a partir dos dados diários medidos pelos sensores, no período desde o início do plantio (2006) até janeiro de 2009.

Foram utilizados os seguintes sensores: temperatura (HMP45C, Vaisala); radiação solar global (Kipp e Zonen - SP LITE), e precipitação (TB3 CS700-L, Hydrological Services).

1.3. Correção da Radiação solar em superfícies inclinadas

Foi realizada a correção da radiação em superfícies inclinadas por meio da equação proposta por Iqbal (1983):

$$R_g = I_n \cdot \cos\theta + D_i \cdot \cos^2\left(\frac{i}{2}\right) + a [I_n \cdot \cos z + D_i] \cdot \sin^2\left(\frac{i}{2}\right) \quad (1)$$

em que: R_g = radiação solar global ($\text{KJm}^{-2}\text{h}^{-1}$); I_n = radiação solar direta normal à superfície ($\text{KJm}^{-2}\text{h}^{-1}$); D_i = radiação solar difusa ($\text{KJm}^{-2}\text{h}^{-1}$); θ = ângulo vertical de incidência dos raios solares diretos; z = azimute ou orientação da superfície (graus); i = inclinação da superfície (graus) e a = albedo da superfície (adimensional).

Para separar a direta da difusa utilizaram-se as equações ajustadas geradas pelo modelo de Facco et al., (2009).

1.4. Estimativas do IAF

Parece haver um consenso em adotar a expressão índice de área de planta (IAP) para equipamentos com princípios óticos de estimativas de IAF por incluírem em suas leituras outros componentes do dossel (galhos, troncos) elementos além de folhas (Stenberg et al., 2003).

Conforme resultados obtidos no primeiro capítulo, o analisador de dossel LAI-2000 (LI-COR) apresentou melhores medidas do IAP em relação ao método das fotografias hemisféricas para mesmos talhões trabalhados. Assim, utilizou-se o LAI-2000 (LI-COR) no modo remoto de operação, com dois sensores óticos: uma unidade de controle fixa instalada em áreas a céu aberto e a outra unidade móvel em medições abaixo do dossel. Devido à inclinação da área de estudo foi utilizado o ângulo de abertura de 180° . Foram obtidas cinco medidas de IAP por parcela, sendo cada medida obtida a partir de cinco repetições longo de cada linha de plantio (Figura 2). Procurou-se posicionar a direção do sensor de acordo com as condições topográficas da área de trabalho. Em locais planos, uma direção constante e nos inclinados, no sentido contrário ao aclave.

As coletas foram realizadas no mês de janeiro de 2009, representando a estação chuvosa.

1.5. Modelo 3PG

1.5.1. Descrição do modelo

A descrição completa do modelo é fornecida por Landsberg e Waring (1997), Sands e Landsberg (2002). Essencialmente, o 3-PG estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA) por meio da lei de Beer, considerando que radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é 50% da radiação solar.

A estrutura geral do modelo composta por cinco sub-modelos: (1) assimilação de carboidratos, preditos pela modificação ambiental da eficiência do uso da radiação, assumindo um raio constante de produção líquida primária; (2) distribuição de biomassa entre a folhagem, raiz e tronco, influenciados pelas condições de crescimento e tamanho das árvores; (3) mortalidade das árvores no talhão; (4) manejo florestal (índice de área foliar do dossel, área basal, volume do talhão, diâmetro a altura do peito (DAP), média anual do incremento do volume) e (5) balanço hídrico no solo, onde a evapotranspiração é calculada usando o modelo de Penman–Monteith.

O modelo tem como entradas os dados climáticos de médias mensais de temperatura máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$); radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); precipitação (mm); dias de geadas (dias/mês); de pressão de vapor (mbar). O 3PG pode ser executado utilizando dados climáticos médios mensais de uma série histórica ou uma série definida em algum intervalo de tempo de interesse. Outros dados de entrada são relacionados aos solos como a taxa de fertilidade, textura e disponibilidade hídrica máxima no solo planta (biomassa inicial de folha, lenho e raízes, número de árvores, coeficientes de equações alométricas; e as fisiológicas: eficiência quântica do dossel, condutância estomática máxima do dossel) e à latitude local.

As saídas do 3PG podem ser também em valores mensais ou anuais. Elas incluem o a biomassa do fuste, raiz e folhagem (t ha^{-1}), água disponível no solo (mm), transpiração do talhão (mm), o IAF do dossel, volume ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) diâmetro médio a altura do peito (cm), área basal (cm^2), incremento médio de volume anual ($\text{m}^3/\text{ha.ano}$), número de troncos (árvores ha^{-1}) e queda de “litter” (folhagem/ano).

A versão do 3PG utilizada foi o 3PGpjs2.4, baseado na versão do 3PG implementado em interface Microsoft Excel.

1.5.2. Parametrização

Utilizou-se a parametrização realizada por Silva (2006) onde foi desenvolvido um experimento de fertirrigação em híbridos de *Eucalyptus grandis* juntamente com outras medições acrescidas de informações já existentes da empresa nas mesmas regionais deste estudo (Tabela 1).

Propôs-se alteração na taxa de respiração por ser esta altamente dependente da condição térmica do ambiente e da eficiência quântica do dossel e pelo fato de as regiões estudadas serem bastante distintas nesse aspecto.

Tabela 1. Principais parâmetros do modelo 3-PG com a calibração realizada por Silva (2006) em plantios de eucalipto na bacia do Rio Doce, M.G..

Parâmetro	Símbolo	U	Silva (2006)	F
Partição folha/lenho para D = 2 cm	pFS2	-	1	O
Partição folha/lenho para D = 20 cm	pFS20	-	0.09	O
Constante do relacionamento entre massa do lenho vs D	stemConst	-	0.1076	O
Potência do relacionamento entre massa do lenho vs D	stemPower	-	2.51	O
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0.5	L
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0.1	L
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0.001	P
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaF1	1/mês	0.1	A
Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(0 \sigma^+)$	tgammaF	mês	12	L
	Rttover			
Taxa média de ciclagem radicular	1/mês	1/mês	0.015	P
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8	L
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25	L
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40	L
Valor de fN quando FR = 0	fN0	-	0,5	P
Potência de (1 – FR), na expressão do fN	fNn	-	1	P
Nível de fertilidade (FR)	FR	-	0,7	A
Define a resposta estomática ao déficit de pressão do vapor	CoeffCond	mbar -1	0.04	L
Parâmetro relacionado com disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	0/cl	A
Idade máxima do povoamento para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9	L
Potência para idade relativa (fage)	nAge	-	4	L
Idade relativa igual a 0,5	rAge	-	0,95	L
Condutância máxima do dossel	MaxCond	m/s	0,02	L
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAIgcx	m ² /m ²	3,33	P
Condutância da camada limite do dossel	BLcond	m/s	0,2	P

Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	kg/arv.	300	P
Área foliar específica para plantios em idade zero	SLA0	m ² /kg	17	O
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m ² /kg	8,24	O
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma +) 1 \sigma$	tSLA	Ano	0,81	O
Interceptação máxima de água pelo dossel	MaxIntcptn LAImax-	-	0,15	L
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	Intcptn	m ² /m ²	3,33	P
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	k	-	0,47	L
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	ano	1	A
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,07*/0,08**	A
Relação PPL/PPB	Y	-	0,48*/0,49**	L
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial	fracBB0	-	0,79	O
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,11	O
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(+)$	tBB	Ano	1,35	O
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial		t/m ³	0,356	O
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m ³	0,5	O
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(+p)$	tRho	ano	2,1	O

U = unidade; D = diâmetro; PPL = produção primária líquida; Soil class = item de inicialização do 3-PG relacionado com a disponibilidade de água no solo, nesse caso, o valor zero indica não haver limitação hídrica pelo solo e foi utilizado no procedimento de calibração; cl = indica a classe textural do solo (argiloso) que foi utilizado para validação do 3-PG; PPB = produção primária bruta; O = observado; L = literatura; P = Padrão (modelo original) e A = ajustado; *Valores adotados para Rio Doce; **Valores adotados para Cocais

Com o modelo parametrizado, foi realizada a simulação para os dois talhões de estudo.

3. Resultados e Discussões

A Bacia do Rio Doce, local desse trabalho, está localizada em região tropical (Tabela 2). A variação na altitude entre as áreas de estudo é próxima a 730 m, sendo esta diferença um fator que influencia expressivamente as condições climáticas presentes em cada talhão.

Em uma análise por parcela, verifica-se que as condições topográficas evidenciam um relevo mais suave em Cocais, sobretudo quando se compara à parcela Sul de Rio Doce.

Tabela 2. Caracterização do relevo e o posicionamento geográfico dos talhões.

Talhão Idade/Região	Face	Altitude (m)	Azimute (°)	Declividade (°)	Latitude (°)	Longitude (°)
32 (Cocais)	N	916	350	11	-19,47	-42,79
	S	961	196	18	-19,47	-42,79
32 (Rio Doce)	N	230	352	12	-19,30	-42,41
	S	251	168	31	-19,29	-42,42

Os totais diários médios observados (Figura 1) apresentam variabilidades semelhantes ao longo dos meses de estudo, com desvio máximo de $1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ em relação à média. Maior disponibilidade de energia é verificada em Rio Doce, onde se encontram as menores altitudes.

Para as regiões em estudo, encontrou-se uma diferença média de cerca de 15,9 % de redução de radiação global na região mais alta, indicando existir uma maior nebulosidade desta região quando comparada à Rio Doce, provavelmente promovido pela interação atmosfera-fisiografia do terreno. Um comportamento semelhante foi verificado por Batlles et al., (2008), analisando o efeito orográfico na estimativa da radiação global. Blumthaler et al., 1997 encontrou uma redução de 8% na irradiância solar global a cada 1000 metros de elevação para uma condição atmosférica homogênea quanto aos aerossóis e sem nuvens.

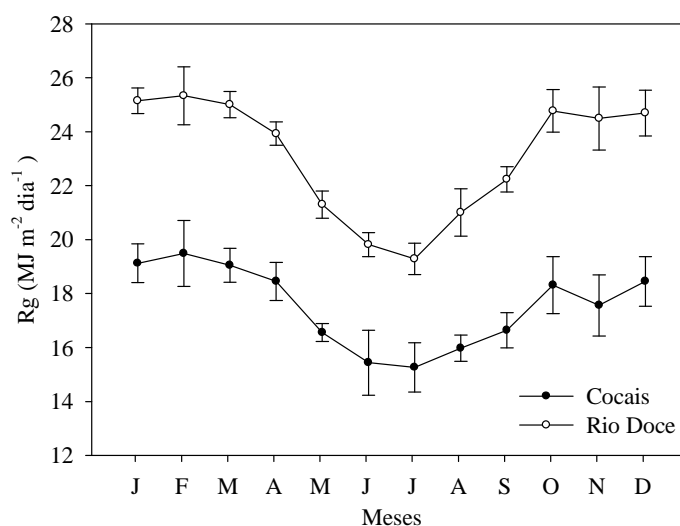


Figura 1. Médias mensais e o desvio padrão da radiação solar global na região de Cocais (Altitude média = 939 m) e Rio Doce (Altitude média = 240 m) medidas no intervalo de 01/01/06 a 01/02/09.

Na maior parte do ano, verifica-se que as faces sul apresentam menor incremento da radiação solar incidente em relação às faces norte (Figura 2). Em relação aos dados médios, verifica-se que esta face recebe menor quantidade de radiação, com diferença de até 55% calculada para o mês de junho. O oposto é observado na face de exposição norte que possui um incremento médio mensal de até 22% da radiação global, também para o mês de junho.

O ângulo dos raios solares em relação a este tipo de face de exposição do terreno juntamente com a latitude do local possuem influencias direta nesta resposta. As faces voltadas para o sul recebem mais energia em um período observado entre os meses de novembro a fevereiro. Este padrão de resposta sazonal foi também observado por Facco et al., (2009), trabalhando em uma microbacia de relevo ondulado com plantios de eucalipto também na Bacia do Rio Doce.

Observa-se uma amplitude entre as duas regiões na face sul, chegando a 26% de variação da correção da radiação global no mês de junho. Na face norte, nota-se certa homogeneidade nas correções entre as regiões ao longo do ano. Esta resposta tem grande contribuição da maior diferença na inclinação da face sul de Cocais (18,4°) e Rio Doce (31,7°), distinta da face norte que apresenta variação de 1,09° entre as regiões.

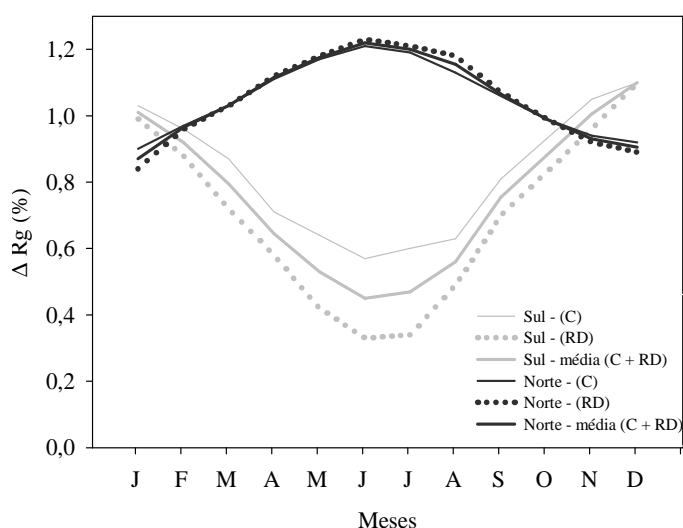


Figura 2. Variação da correção da radiação solar global (ΔR_g) de acordo com orientação do terreno, faces norte e sul, nas regiões de Cocais (C) e Rio Doce (RD).

Embora as medidas de IAP do sensor LAI2000 e das estimativas do IAF por meio do modelo 3PG apresentem valores superiores para a face norte, nos dois

talhões (Figura 3), esta diferença apresenta-se significativa ($p < 0,05$) apenas para os talhões da face norte de Cocais.

Verifica-se que, embora ambas as regiões tenham bom suprimento hídrico, Rio Doce apresenta maior demanda evapotranspirativa com temperaturas e déficits maiores durante o ano, conforme observado no segundo capítulo, o que pode explicar os maiores valores de IAF em Cocais encontrado nas duas faces avaliadas. Souza, et al. 2006 verificaram uma diminuição da condutância estomática do eucalipto na presença de maior déficit de pressão de vapor em Rio Doce. Nestas condições, é observado um fechamento estomático, gerando uma redução nas trocas gasosas da folha e conseqüentemente no processo fotossintético.

Parece razoável inferir que o ganho no IAF nas faces voltadas para o norte em relação às superfícies planas e voltadas para o sul respectivamente, advenha da margem de resposta existente, devido às condições ambientais para um incremento da biossíntese à semelhança do que foi observado no trabalho de Duz et al., (2004).

Algumas das principais mudanças decorrentes do aumento na quantidade de radiação solar, como observado na face norte, são: 1) o aumento na espessura foliar, resultando em maior relação massa/área foliares (Lee *et al.* 1996); 2) o aumento na densidade estomática (Lee *et al.* 2000) e a orientação das folhas de maneira a minimizar a interceptação da energia lumínica excedente (Ishida *et al.*, 1999). Duz et al., (2004) verificaram para espécies arbóreas da floresta atlântica que a capacidade fotossintética, expressa por meio da taxa de assimilação líquida, foi aumentada na condição de um incremento de irradiância de 2 até 30%.

Por outro lado, as espécies que vivem em condições de baixa radiação, desenvolvem processos adaptativos condicionados pelo ambiente. Estas adaptações estão associadas com as mudanças anatômicas e fisiológicas na folha (Klich, 2000) exibindo, de uma maneira geral, folhas maiores. Para o caso da espécie em estudo, que se desenvolve em áreas de espaçamentos definidos, este comportamento não foi pronunciado devido à menor competição luminosa entre as árvores e o reduzido auto-sombreamento das folhas pela baixa densidade do plantio.

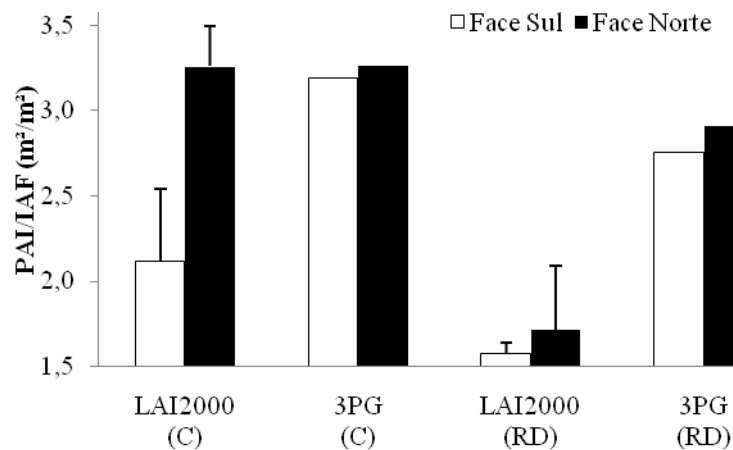


Figura 3. Dados de IAP medidos pelo sensor LAI2000 e IAF estimados pelo modelo 3PG nas faces norte e sul nas regiões de Cocais (C) e Rio Doce (RD).

A produtividade dos talhões é apresentada em termos médios para outras variáveis de saída do modelo 3PG (Figura 4). O volume simulado é maior nas faces norte, com 8,27 e 7,8 m³/ha⁻¹. ano para as regiões de Cocais e Rio Doce respectivamente, em resposta a maior radiação disponível nestes locais, à semelhança do IAF. O mesmo é verificado para o incremento médio anual (IMA), a produção primária (PPB) bruta e a líquida (PPL)

As variáveis estimadas que expressam a produção de madeira se apresentaram maiores em Rio Doce, conforme já verificado em inventários realizados nestes mesmos locais (primeiro capítulo). A maior taxa de crescimento nos anos iniciais de plantio pode ter cooperado com este ganho na idade estudada. Souza et al., (2006) verificaram que o incremento periódico de volume nos anos finais do ciclo em inventários realizados em Rio Doce é inferior a outro sítio de altitude próxima a Cocais. O ganho foliar observado nos talhões de Cocais pode influenciar na menor alocação de biomassa para o lenho neste estágio inicial do ciclo, já que são processos concorrentes.

Em análises de biomassa realizadas no *E. grandis*, Du Toit (2008) verificou que a partição foi de cerca de 6,5% para as folhas, 31,8 % para galhos e ramos, 54,5 % para o lenho e 7,1 para a raiz. Estes resultados estão próximos à distribuição realizada pelo modelo para as distintas partes da árvore no presente estudo.

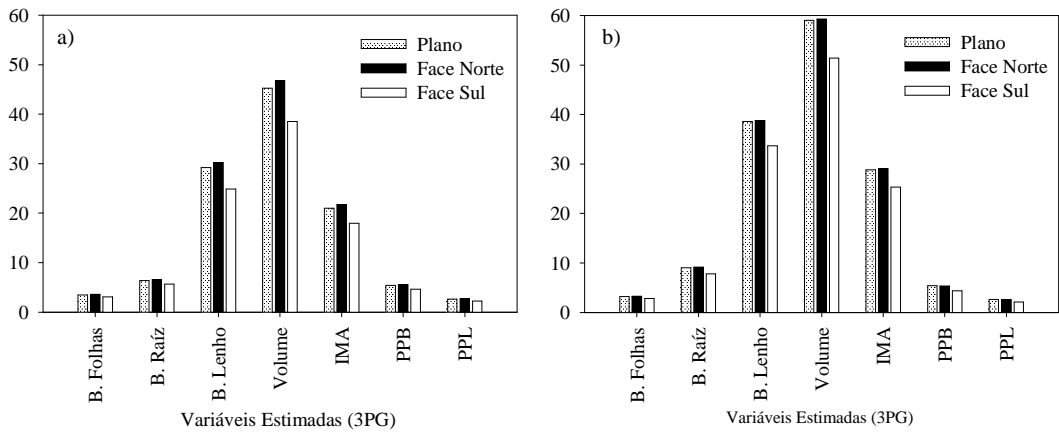


Figura 4. Variáveis estimadas pelo modelo 3PG: Volume ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$), IMA ($\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}$), PPB ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), PPL ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), biomassa de folhas ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), biomassa da raiz ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$), biomassa do lenho ($\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$) nas faces de exposição norte e sul nas regiões de Cocais (a) e Rio Doce (b) em idade de 32 meses.

No plantio em Cocais, a face norte se distingue com maiores IAF estimados pelo modelo 3PG em relação a locais planos (Figura 5). Nas duas regiões as faces sul apresentam IAF subestimado em quase toda a série mensal do ciclo de plantio.

A época seca é pronunciada em agosto a setembro e a chuvosa em janeiro a fevereiro, sendo observado um atraso na resposta de incremento de IAF simulado com picos próximos ao mês de março para ambos os talhões e condições de relevo. Este atraso pode ser devido à condição de armazenamento de água no solo. Almeida e Soares (2003) trabalhando em plantios de eucalipto em um local com maiores precipitações ocorridas nos meses de janeiro/dezembro, verificaram que a condutância estomática foi máxima no mês de abril onde o armazenamento de água no solo foi máximo.

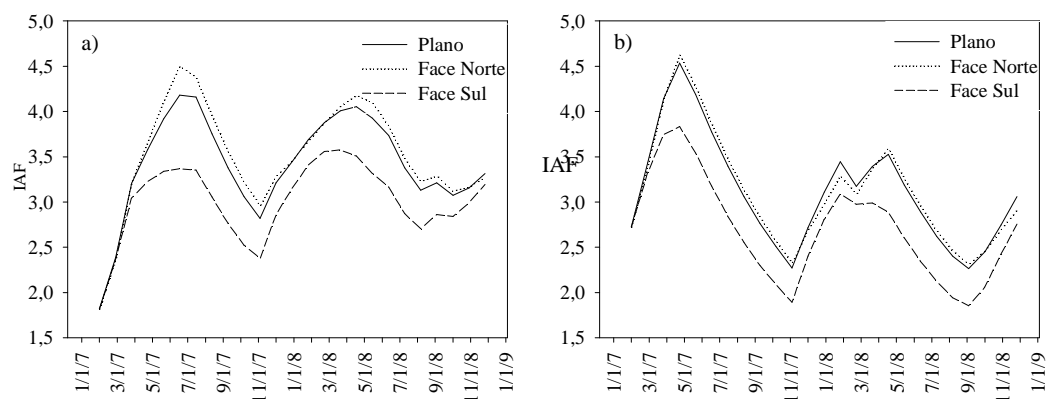


Figura 5. Variação mensal do IAF estimado pelo modelo durante o ciclo de plantio em COCAIS (a) e RIO DOCE (b).

Os resultados encontrados neste estudo não são conclusivos em relação às faces de exposição. Devem ser feitos estudos para verificar se a tendência verificada se repete. Sugere-se realizá-los em plantios situados em locais de maiores latitudes, onde provavelmente o efeito da inclinação da superfície com incidência de radiação seria melhor observado e onde haja maiores diferenças na inclinação do terreno.

4. Conclusões

Foram encontrados maiores valores medidos de IAP pelo sensor LAI2000 e de IAF estimados pelo modelo 3PG na face de exposição norte, onde foi verificada, pela de correção da radiação global, maior incidência da radiação solar em relação às faces sul.

As simulações realizadas pelo modelo 3PG corroboram com os dados observados a campo em que a produtividade é maior em Rio Doce na idade trabalhada. Verificou-se que na face sul encontrou-se maiores perdas em relação à face norte.

5. Referências Bibliográficas

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; AMBROGI, M. S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S. M.; BERTOLUCCI, F. L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**. v. 193, p. 167–177, 2004.

ALMEIDA, A.C., SOARES, J.V. Comparação entre o uso de água em plantações de *Eucalyptus grandis* e floresta ombrófila densa (Mata Atlântica) na costa leste do Brasil. **Revista Árvore**, v. 27, p.159-170, 2003.

BATLLES, F. J.; BOSCH, J. L. ; TOVAR-PESCADOR, J.; MARTINEZ-DURBAN, M.; ORTEGA, R.; MIRALLES, I. Determination of atmospheric parameters to estimate global radiation in areas of complex topography: Generation of global irradiation map. **Energy Conversion and Management**. v. 49, p. 336–345, 2008.

BLUMTHALER, M.; AMBACH, W.; ELLINGER, R. Increase in solar UV radiation with altitude. **Journal Photochemistry Photobiology**. v.39, p.130–4, 1997.

- BUSBY, P.; MOTZKIN, G. Dwarf beech forests in Coastal New England: topographic and edaphic controls on variation in forest structure. **Am. Midl. Nat.** v.162, p.180–194, 2009.
- CARVALHO, D.A. ET AL. Variações florísticas e estruturais do componente arbóreo de uma floresta ombrófila alto-montana às margens do rio Grande, Bocaina de Minas, MG, Brasil. **Acta Botanica Brasílica**, v.19, n.1, p.91-109, 2005.
- DU TOIT, B. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. **Forest Ecology and Management**. v. 255, p. 2324–2336, 2008.
- DUZ, S.R.; SIMINSKI, A.; SANTOS, M.; PAULILO, M.T.S. Crescimento inicial de três espécies arbóreas da Floresta Atlântica em resposta à variação na quantidade de luz. **Revista Brasil. Bot.**, v.27, n.3, p.587-596, 2004.
- FACCO, A. G.; RIBEIRO, A.; SEDIYAMA, G. C.; LEITE, F. P.; BARROS, N.F. Saldo de radiação em plantios de eucalipto em áreas de relevo ondulado. **Revista Árvore**. v.33, n.3, p.471-480, 2009.
- IQBAL, M. Correlation of average diffuse and beam radiation with hours of bright sunshine. **Solar Energy**, v.23, n.2, p.169-173, 1979.
- ISHIDA, A.; TOMA, T.; MARJENA, H. Limitation of leaf carbon gain by stomatal and photochemical processes in the canopy of *Macaranga conifera*, a tropical pioneer. **Tree Physiology**, v. 19, p.467-473. 1999.
- KLICH, M.R. Leaf variations in *Elaeagnus angustifolia* related to environmental heterogeneity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 44, p. 171-183, 2000.
- LEE, D.W.; BASKARAN, K.; MANSOR, M.; MOHAMAD, H.; YAP, S.K. Irradiance and spectral quality affect Asian tropical rain forest tree seedling development. **Ecology**, v. 77, p.568-580, 1996.
- LEE, D.W.; OBERBAUER, F.; JOHNSON, P.; BASKARAN, K; MANSOR, M.; MOHAMAD, H.; YAP, S.K. Effects of irradiance and spectral quality on leaf structure and function in seedlings of two Southeast Asian *Hopea* (Dipterocarpaceae) species. **American Journal of Botany**, v. 87, p.447-455, 2000.
- LANDSBERG, J. J.; GOWER, S. T. **Applications of physiological ecology to forest management**. San Diego, California: Academic Press. p. 354.1997.
- LANDSBERG, J.J., WARING, R.H., A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **For. Ecol. Manage**, v.95, p.209–228, 1997.
- LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**, São Carlos: Rima. 531 p. 2004.

- MEFTI, A.; BOUROUBI, M. Y.; ADANE, A. Generation of hourly solar radiation for inclined surfaces using monthly mean sunshine duration in Algeria. **Energy conversion and Management**, v.44, n.19, p.3125-3141, 2003.
- MIEHLE, P.; BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J.; FORRESTER, D. I.; FEIKEMA, P. M.; LIVESLEY, S. J.; MORRIS, J. D.; ARNDT, S. K. A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of *Eucalyptus globulus* plantations. **Ecological Modelling**, v.220, p. 734–746, 2009.
- PAUL, K.I.; BOOTH, T.H.; JOVANOVIĆ, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J. D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, p. 237–247, 2007.
- PEZZOPANE, J. E.M. **Caracterização microclimática, ecofisiológica e fitossociológica em uma floresta estacional semidecidual secundária, em Viçosa, MG**. Viçosa, MG: UFV, 2001. 240f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- POULSON, L.T.; PLATT, W.J. Gap light regimes influence canopy tree diversity. **Ecology**, v.70, p. 553 – 55, 1989.
- RITTER, E.; DALSGAARD, L.; EINHORN, K.S. Light, temperature and soil moisture regimes following gap formation in a semi-natural beech-dominated forest in Denmark. **Forest Ecology and Management**. v. 206, p. 15 – 33, 2005.
- RODRÍGUEZ, R.; REAL, P.; ESPINOSA, M.; PERRY, D. A. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, v. 82, n.2, p.149-162, 2009.
- SANDS, P.J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p.273–29, 2002.
- SARIYILDIZ, T.; KUCUK, A. M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 37, p. 1695–1706, 2005.
- SHERMAN, R. E.; MARTIN, P. H.; FAHEY, T. J.; DEGLORIA, S. D. Fire and vegetation dynamics in high-elevation neotropical montane forests of the Dominican Republic. **Ambio**, v. 37, n. 7–8, 2008.
- SIDARI, M.; RONZELLO, G.; VECCHIO, G.; MUSCOLO, A. Influence of slope aspects on soil chemical and biochemical properties in a *Pinus laricio* forest ecosystem of Aspromonte (Southern Italy). **European Journal of Soil Biology**, v.44, p.364-372, 2008.
- SOUZA, J.S.; ESPIRITO-SANTO, F. D. B.; FONTES, M. A. L.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; BOTEZELLI, L. Análise das variações florísticas e estruturais da comunidade arbórea de um fragmento de floresta semidecídua às margens do rio Capivari, Lavras, MG. **Revista Árvore**, v.27, p.185-206, 2003.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P. ; MINUZZI, R. B. Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade do eucalipto em diferentes idades, em Guanhães, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 629-638, 2006.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D..Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 219–234, 2004.

STENBERG, P.; NILSON, T.; SMOLANDER, S.; VOIPIO, P. Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v 29, p.363–370. 2003.

VADREVU, K.P. Analysis of fire events and controlling factors in eastern India using spatial scan and multivariate statistics. **Geogr. Ann.**, v.90 (4), p.315–328. 2008.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicada**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. p.133-203.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76, 1947.

WHITE, J.D.; COOPS, N.C.; SCOTT, N.A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. **Ecology Model**. v. 131, p.175–190, 2000.

Estimativas do índice de área foliar por meio de índices de vegetação: uma metodologia para calibração de modelo ecofisiológico em plantios de eucalipto

Estimates of leaf area index using vegetation indices: a methodology for calibration of an ecophysiological model in eucalyptus plantations

Yhasmin Gabriel Paiva

Aristides Ribeiro

José Marinaldo Gleriani

José Eduardo de Macedo Pezzopane

Resumo: O índice de área foliar (IAF) é uma variável biofísica requerida em modelos ecofisiológicos. Expressa a área foliar integrada do dossel por unidade de superfície projetada no solo. Na medição do IAF por sensores de princípios óticos, outros elementos além de folhas são incluídos em suas leituras por isso, parece haver um consenso adotar o termo “índice de área de planta” (IAP). Os índices de vegetação (IV's) foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação às características dos solos. O modelo 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) estima a produtividade florestal e tem sido usado com bom desempenho em plantios equiâneos. O objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia alternativa de calibração de modelos de crescimento de floresta utilizando técnicas de sensoriamento remoto para melhoria da resolução espacial e temporal frente à calibração atualmente realizada por meio do inventário florestal. O estudo foi realizado em quatro talhões de plantios de eucalipto com idades de 32 e 58 meses localizados na bacia do Rio Doce, leste do Estado de Minas Gerais, nas regiões de Rio Doce e Cocais situadas em baixas e maiores altitudes respectivamente. Realizaram-se as medições do IAP por meio do equipamento LAI-2000 (LI-COR) e do inventário florestal em nove parcelas alocadas em cada talhão. Os dados experimentais foram coletados nos meses de agosto (2008) e janeiro (2009) representando os períodos mais secos e úmidos do ano. Os dados meteorológicos foram adquiridos por meio de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada regional em estudo. Utilizou-se o modelo 3PG com parametrização já feita para as regiões de estudo. Trabalhou-se com os dados de Enhanced Vegetation Index (EVI) e do Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), produtos do sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Para a calibração do modelo, utilizou-se o IAF estimado pelo índice melhor correlacionado ao IAP. O NDVI foi o índice com melhores respostas ao IAP coletado a campo. O modelo 3PG calibrado pelo NDVI apresenta boas estimativas pontuais com os dados observados (IAP e inventário) e temporais verificada pelos

dados IV's-MODIS. A metodologia proposta se mostrou útil, uma vez que apresentou resultados satisfatórios ao objetivo do estudo.

Palavras Chave: modelagem ecofisiológica, 3PG, sensor Modis, índice de vegetação

Abstract: The leaf area index (LAI) is a biophysical variable required in ecophysiological models. It expresses the integrated leaf area of the canopy per surface unit projected on the ground. To measure the LAI using optical sensing principles, other elements than leaves are included in the readings, so it seems to be a consensus to adopt the term "plant area index" (PAI). The vegetation indices (VIs) were designed to express the spectral performance of vegetation in relation to soil properties. The model 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) estimates forest productivity and has been used satisfactorily in even-aged plantations. The purpose of this study was to propose an alternative method of calibration of forest growth models using remote-sensing techniques to improve the spatial and temporal resolution compared to the currently used calibration based on forest inventory. The study was conducted in four stands of 32 and 58-month-old eucalyptus plantations in the Rio Doce basin, eastern Minas Gerais, in the regions of Rio Doce and Cocais, at low and high altitude, respectively. The PAI was evaluated by a LAI-2000 (LI-COR) canopy analyzer and by the forest inventory, in nine plots allocated to each plot. The experimental data were collected in August (2008) and January (2009), the wettest and driest periods of the year. Meteorological data were obtained at two weather stations in the surroundings of the stands. The 3PG model applied had been parameterized for the study regions. The data of Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), products of the sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) were used. To calibrate the model, the LAI estimated by the index best correlated with PAI was used. The NDVI was the index with best response to the PAI obtained in the field. The estimates of the model 3PG calibrated by NDVI were coincident with the observed data (PAI and inventory) and temporal data recorded by MODIS-VIs. The proposed methodology proved useful, since the results for the study objective were satisfactory.

Key words: ecophysiological modelling, 3PG, MODIS, vegetation index

1. Introdução

De acordo com a definição de Watson (1947), o índice de área foliar (IAF) é uma relação adimensional da área do tecido foliar por superfície de solo, caracterizando o dossel de um ecossistema. É um parâmetro dinâmico da vegetação dependente de fatores como a espécie, estágio de desenvolvimento, condições predominantes de sítio, sazonalidade e práticas de manejo. O IAF pode influenciar o microclima dentro e acima do dossel, determinando e controlando a interceptação da água, a extinção da radiação, sendo um componente chave do ciclo biogeoquímico no ecossistema (Bréda, 2003).

Na estimativa do IAF em plantios de eucalipto, têm-se usado instrumentos de princípios óticos, dentre eles o modelo LAI-2000 (LICOR) (Ares e Fownes, 2000; Chaves, et al., 2007; Monte et al., 2007). Estas medições não distinguem os elementos fotossinteticamente ativos e outros elementos da planta, tais como galhos, troncos, levando a medidas menos precisas do IAF (Stenberg et al., 2003). Por esta razão, o termo “índice de área de planta” (IAP) será usado neste trabalho representando a medida quantitativa estimada por este instrumento ótico conforme adotado por Roupsard et al., 2008 e Cunningham et al., 2009.

Os modelos utilizados em floresta são representações matemáticas do sistema biológico incorporando processos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos (Johnsen et al., 2001). O IAF é uma variável biofísica requerida em modelos de produção primária e globais de clima, hidrologia, ecologia (Dickinson et al., 1986; Bonan, 1998; Sellers et al., 1996, Xavier, et al., 2004; Guerschman et al., 2009).

O modelo 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth) estima a produtividade florestal baseando-se essencialmente na quantidade de energia radiante que é absorvida pelo dossel, convertida em carboidratos e alocada nos diferentes componentes da árvore como folhas, lenho e raízes (Landsberg e Waring, 1997). Este modelo possui uma base sólida em processos biofísicos e combinações de relações empíricas e mecánísticas derivados de experimentos realizados em médio e longos períodos em plantios florestais (Sands e Landsberg, 2002).

O 3PG tem sido usado com bom desempenho em plantios equiâneos do gênero *Eucalyptus* em diversos países como o Brasil (Almeida et al., 2004; Stape et al., 2004; Souza, 2006); Portugal (Amaral, et al., 2005); Austrália (Sands e

Landsberg, 2002; Paul et al., 2007); Nova Zelândia (Coops et al., 1998; White et al., 2000); África do sul (Dye et al., 2004; Esprey et al., 2004), Chile (Rodríguez et al., 2009), dentre outros.

A calibração e validação dos modelos de crescimento vêm sendo realizadas predominantemente com dados de inventário florestal. Estes possuem limitações pelos custos elevados, quando se deseja dispor de uma boa amostragem espacial e contínua. Uma fonte de dados alternativa para a modelagem é obtida através de técnicas de sensoriamento remoto.

Com dados adequados, as estimativas por imagens de satélite podem ser em escalas espaciais e temporais, permitindo comparações de padrões sazonais para variações inter-anuais da atividade da vegetação à custos relativamente baixos (Heinsch et al., 2006). As observações remotas em uma mudança fenológica, requererem um número de cenas suficiente para captar o incremento de biomassa verde, diretamente influenciado por variações climáticas ocorridas ao longo do ano ou da série em observação.

O sensor MODIS (“Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer”), foi lançado, a bordo do satélite Terra, em 1999, apresentando 36 bandas espectrais, no intervalo de 0,4 a 14,4 μm , disponíveis em uma resolução que varia de 250 m a 1 km (Justice et al., 1998). Dentre os diversos produtos, têm-se os índices de vegetação (IV’s).

Os IV’s foram concebidos para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em relação aos outros alvos da superfície terrestre. Em princípio, quanto maior for a densidade da cobertura vegetal, em uma determinada área, menor será a reflectância na região do visível devido à maior oferta de pigmentos fotossintetizantes. Por outro lado, maior será a reflectância verificada na região do infravermelho próximo devido ao espalhamento múltiplo da radiação eletromagnética nas diferentes camadas de folhas. A fundamentação da proposição destes índices reside no comportamento antagônico da reflectância da vegetação nas duas regiões espectrais mencionadas (Ponzoni e Shimabukuro, 2007). A importância dos IV’s para mapear o IAF está nas estimativas da fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelos dosséis das plantas (Walter-Shea et al., 1997) bem como da biomassa e percentagem de cobertura verde da superfície.

Dentre os IV’s, o “*Normalized Difference Vegetation Index*” (NDVI) tem sido amplamente usado por duas décadas na estimativa em grande escala de

propriedades das plantas (Gamon et al., 1993; Wylie et al., 2002; Chuvieco et al., 2004). Huete (1988) encontrou que o NDVI foi sensível as variações do dossel e exibiu sinais de saturação para condições de alta densidade de biomassa presente. O “*Enhanced Vegetation Index*” (EVI) foi desenvolvido para otimizar a resposta da vegetação, melhorando a sensibilidade em regiões com maiores densidades de biomassa além do monitoramento da vegetação através de uma ligação do sinal de fundo do dossel e a redução das influências atmosféricas (Justice et al., 1998).

Estas imagens são freqüentemente empregadas na estimativa não destrutiva da biomassa fotossinteticamente ativa (folhas) de várias formações vegetais (Boelman et al., 2003; Foody et al., 2001), com resultados promissores quando usados em modelos de balanço hídrico (Cleugh et al., 2007; Leuning et al., 2008; Mu et al., 2007; Zhang et al., 2008). Recentemente, tem sido implementado os dados de sensoriamento remoto como entrada de dados para o modelo 3-PG (Nightingale et al., 2008), utilizando as imagens MODIS (Nightingale et al., 2007; Coops et al., 2007).

O objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia alternativa de calibração de modelos de crescimento de floresta, utilizando técnicas de sensoriamento remoto para aprimorar a resolução espacial e temporal frente à calibração atualmente realizada por meio do inventário florestal. Especificamente, pretendem-se testar os IV's: NDVI e EVI na estimativa do IAF para a calibração do modelo mecanístico 3PG.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado em plantios florestais clonais do gênero *Eucalyptus* pertencentes à empresa Celulose Nipo-brasileira S/A (CENIBRA), localizada na bacia do Rio Doce, a leste do Estado de Minas Gerais (MG). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo AW – Tropical Quente Semi-Úmido, com um inverno seco marcado por baixos índices de precipitação.

Trabalhou-se em quatro talhões clonais: Milagres e Sorós (Região do Rio Doce) localizados no município de Belo Oriente e Vai e Volta e Barrinhas (Região de Cocais) que fazem parte do município de Antônio Dias.

A localização geográfica dos talhões, bem como a área e as características do plantio são apresentadas na Tabela 1. Visto que as duas regiões são de altitudes e condições edafo-climáticas distintas, não foi possível a padronização dos clones. Assim, escolheu-se trabalhar com aqueles que apresentaram maiores produtividades, segundo dados da empresa, representando o potencial das regiões. Para cada região, foram trabalhadas as áreas com o mesmo clone, duas idades distintas e espaçamentos de 3 x 3,33 m.

Tabela 1. Descrição dos talhões de plantio.

Região	Projeto	Área (ha)	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Clone	Idade (meses)
Cocais (R1)	Barrinhas	30	19°17'59"S	42°28'41"O	1070	372	58
	Vai e Volta	74	19°28'13"	42°47'13"O	970	372	32
Rio Doce (R2)	Milagre	40	19°17'44"S	42°25'01"O	300	2719	58
	Sorós	77	19°28'16"S	42°48'23"O	250	2719	32

2.2. *Dados Meteorológicos e Balanço Hídrico*

Os dados foram adquiridos de duas estações automáticas instaladas próximas às áreas dos talhões em cada regional do estudo. Trabalhou-se com a série desde o plantio (2003 e 2006) até o último período de coleta (2009). Foram utilizados os seguintes sensores: temperatura (HMP45C, Vaisala); radiação global (Kipp & Zonen - SP LITE), velocidade do vento (RM Young – 03001-5) e precipitação (TB3 CS700-L, Hydrological Services).

Para avaliar o comportamento sazonal dos dados EVI frente ao suprimento hídrico local, realizou-se o balanço hídrico climatológico, sendo o consumo de água calculado pela equação de Penman-Monteith (1965), que inclui os componentes aerodinâmicos e os do balanço de energia, em dados horários.

A resistência estomática (r_s), variável de entrada no cálculo da evapotranspiração de referência foi calculada a partir de modelos desenvolvidos por Carneiro et al., (2008) em que esta variável foi estimada em períodos secos (equação

1) e chuvosos (equação 2) em um estudo realizado com eucalipto na mesma região deste trabalho.

$$r_s = 418,7 (DPV T Rg^{-1})^{0,5415} \quad (1)$$

$$r_s = 1694,6 (DPV T Rg^{-1})^{1,0568} \quad (2)$$

Onde: R_g é a irradiância solar global, ($MJ m^{-2} hora^{-1}$); T é a Temperatura Média do ar ($^{\circ}C$) e DPV o Déficit de Pressão de Vapor do ar (kPa).

2.3. Índices de Vegetação

Utilizou-se os IV's (NDVI e EVI) produto do sensor MODIS (MOD13Q1). Estes foram obtidos gratuitamente através da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) por meio eletrônico. O período coletado foi o correspondente ao dos dados meteorológicos, totalizando 144 imagens.

Cada imagem é um produto referente a múltiplas observações de resolução temporal (R_t) de 16 dias e resolução espacial (R_e) de 250 metros em que foram aplicados filtros de qualidade, de nuvem e de geometria de visada, que eliminam, por exemplo, dados com contaminação por nuvem (Justice et al., 1998).

O NDVI pode ser calculado por meio da expressão (Deering et al., 1975):

$$NDVI = \frac{(IVP - V)}{(IVP + V)} \quad (3)$$

em que: V corresponde à reflectância na faixa espectral do vermelho e IVP à reflectância na faixa espectral do infravermelho próximo, ambos adimensionais.

O EVI pode ser calculado através da seguinte equação:

$$EVI = \frac{G(IVP - V)}{(L + IVP + C_1V - C_2A)} \quad (4)$$

em que: L é fator de ajuste para o solo; C_1 e C_2 são coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera; A , V e IVP são as reflectâncias da região espectral do azul,

vermelho e infravermelho próximo respectivamente. Os valores dos coeficientes são: $L=1$, $C1=6$, $C2=7.5$ e o fator de ganho $G= 2,5$ (Justice et al., 1998).

Os dados MODIS são disponibilizados inicialmente no formato HDF (“*Hierarchy Data Format*”), com resolução radiométrica de (Q) de 16 bits nas projeções Integerized Sinusoidal ou Sinusoidal. Realizou-se o pré-processamento para se trabalhar no Sistema de Projeção UTM (Projeção Universal Transversal de Mercator) e Datum WGS-84. Para tal, utilizou-se o software livre MRT – MODIS *Reprojection Tool* desenvolvido pela NASA.

A conversão dos dados MODIS disponíveis em 16 para 8 bits foi realizada por meio do software ConvGeotiff (Arai, 2003). Após este processo, as imagens foram trabalhadas em ambiente SPRING 5.0.3.

Apesar de toda análise preliminar de qualidade do produto EVI e NDVI mostrada anteriormente, este ainda apresentou erros, devido ao ruído das bandas individuais que não puderam ser eliminados (Justice et al., 1998). Realizou-se então o processo simples de filtragem, utilizando-se a estatística da mediana para as imagens. A partir das amostras filtradas, determinaram-se os diferentes tipos de comportamento temporal dos IV’s da área em estudo.

2.4. *Estimativas do IAF*

Foram alocadas nove parcelas fixas de 30 x 30 m, distribuídas ao longo de cada talhão. Não foi realizada uma alocação aleatória devido à resolução da imagem ser pequena e as parcelas poderem coincidir medidas do mesmo pixel da imagem. Totalizou-se 36 parcelas para as quatro áreas em estudo.

Procurando avaliar a resposta do IAP e posteriormente da reflectância das imagens frente à variação sazonal das variáveis climáticas durante o ano, o período de coletas foi realizado nos meses de: agosto (2008) representando a estação seca e janeiro (2009), o período chuvoso.

Conforme resultados obtidos no primeiro capítulo, o analisador de dossel LAI-2000 (LI-COR) apresentou melhores medidas de IAP em relação ao método das fotografias hemisféricas analisadas nos mesmos talhões trabalhados. Assim, utilizou-se o LAI-2000 no modo remoto de operação, com dois sensores óticos: uma unidade de controle fixa do equipamento, instalada em áreas de céu aberto e a outra unidade móvel em medições abaixo do dossel. Devido à inclinação da área de estudo e a

presença de nuvens espaçadas, em condições de céu aberto, foi utilizado o ângulo de abertura de 180°. Realizaram-se cinco repetições ao longo de cada linha de plantio para se obter uma medida de IAP, totalizando cinco medidas por parcela. Procurou-se posicionar a direção do sensor de acordo com a topografia presente: locais planos em uma direção constante e inclinados no sentido contrário ao aclave para que não houvesse superestimação do IAP com o solo do terreno.

2.5. *Inventário Florestal*

Foram obtidos a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP) a partir dos dados de inventários realizados em todas as parcelas nos talhões de estudo. Calculou-se o volume por meio do modelo biométrico (equação 5) ajustado para as regionais da empresa e o incremento médio anual (IMA) pela equação 6.

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 \ln DAP + \beta_2 \ln H + \varepsilon \quad (5)$$

em que: V = volume de árvore (m³); $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ = coeficientes para cada localidade estudada; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); H = altura da árvore (m); e ε = erro aleatório.

$$IMA = \frac{V}{Idade} \quad (6)$$

em que: IMA = m².ha⁻¹.ano; v = volume de árvore por hectare (m³.ha⁻¹); Idade (anos)

2.6. *Modelo 3PG*

2.6.1. *Descrição do modelo*

A descrição completa do modelo é fornecida por Landsberg e Waring (1997) e Sands e Landsberg (2002). Essencialmente, o 3PG estima a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa absorvida pelo dossel (RFAA) por meio da lei de Beer, considerando que radiação fotossinteticamente ativa (RFA) é 50% da radiação solar.

A estrutura geral do modelo é composta por cinco sub-modelos: (1) assimilação de carboidratos, preditos pela modificação ambiental da eficiência do uso da luz, assumindo um raio constante de produção líquida primária; (2)

distribuição de biomassa entre a folhagem, raiz e tronco, influenciados pelas condições de crescimento e tamanho das árvores; (3) mortalidade das árvores no talhão; (4) manejo florestal (índice de área foliar do dossel, área basal, volume do talhão, diâmetro a altura do peito (DAP), média anual do incremento do volume) e (5) balanço hídrico no solo, onde a evapotranspiração é calculada usando o modelo de Penman–Monteith.

O modelo tem como entradas os dados climáticos de médias mensais de temperatura máximas e mínimas do ar ($^{\circ}\text{C}$); radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); precipitação (mm); dias de geadas (dias/mês) e pressão de vapor (mbar). O 3PG pode ser executado utilizando dados climáticos médios mensais de uma série histórica ou uma série definida em algum intervalo de tempo de interesse. Outros dados de entrada são relacionados aos solos como a taxa de fertilidade, textura e disponibilidade hídrica máxima no solo planta (biomassa inicial de folha, lenho e raízes, número de árvores, coeficientes de equações alométricas; e as fisiológicas: eficiência quântica do dossel, condutância estomática máxima do dossel) e à latitude local.

As saídas do 3PG podem ser também em valores mensais ou anuais. Elas incluem a biomassa do fuste, raiz e folhagem (t ha^{-1}), água disponível no solo (mm), transpiração do talhão (mm), o IAF do dossel, volume ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$) diâmetro médio a altura do peito (cm), área basal (cm^2), incremento médio de volume anual ($\text{m}^3/\text{ha.ano}$), número de troncos (árvores ha^{-1}) e queda de “litter”.

A versão do 3PG utilizada foi o 3PGpjs2.4, baseado na versão do 3PG implementado em interface Microsoft Excel.

2.6.2. Parametrização

Utilizou-se a parametrização realizada por Silva (2006) onde foi desenvolvido um experimento de fertirrigação em híbridos de *Eucalyptus grandis* juntamente com outras medições acrescidas de informações já existentes da empresa nas mesmas regionais deste estudo (Tabela 2).

Propôs-se a alteração na taxa de respiração por ser esta altamente dependente da condição térmica do ambiente e da eficiência quântica do dossel, e pelo fato de as regiões estudadas serem bastante distintas nesse aspecto.

Tabela 1. Principais parâmetros do modelo 3-PG com a calibração realizada por Silva (2006) em plantios de eucalipto na bacia do Rio Doce, M.G..

Parâmetro	Símbolo	U	Silva (2006)	F
Partição folha/lenho para D = 2 cm	pFS2	-	1	O
Partição folha/lenho para D = 20 cm	pFS20	-	0.09	O
Constante do relacionamento entre massa do lenho vs D	stemConst	-	0.1076	O
Potência do relacionamento entre massa do lenho vs D	stemPower	-	2.51	O
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0.5	L
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0.1	L
Taxa de queda de “litter” para t = 0	gammaF0	1/mês	0.001	P
Taxa de queda de “litter” para plantios em idade adulta	gammaF1	1/mês	0.1	A
Idade em que a taxa de queda de “litter” é $\frac{1}{2}(0 \sigma +)$	tgammaF	mês	12	L
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0.015	P
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8	L
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25	L
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40	L
Valor de fN quando FR = 0	fN0	-	0,5	P
Potência de (1 – FR), na expressão do fN	fNn	-	1	P
Nível de fertilidade (FR)	FR	-	0,7	A
Define a resposta estomática ao déficit de pressão do vapor	CoeffCond	mbar -1	0.04	L
Parâmetro relacionado com disponibilidade de água no solo	Soil Class	-	0/cl	A
Idade máxima do povoamento para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9	L
Potência para idade relativa (fage)	nAge	-	4	L
Idade relativa igual a 0,5	rAge	-	0,95	L
Condutância máxima do dossel	MaxCond	m/s	0,02	L
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAIgcx	m ² /m ²	3,33	P
Condutância da camada limite do dossel	BLcond	m/s	0,2	P
Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	kg/árv.	300	P
Área foliar específica para plantios em idade zero	SLA0	m ² /kg	17	O
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m ² /kg	8,24	O
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma +) 1 \sigma$	tSLA	Ano	0,81	O
Interceptação máxima de água pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15	L
IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAImax-Intcptn	m ² /m ²	3,33	P
Coefficiente de extinção da RFAA pelo dossel	k	-	0,47	L
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	ano	1	A
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,07*/0,08**	A
Relação PPL/PPB	Y	-	0,48*/0,49**	L
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial	fracBB0	-	0,79	O
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,11	O
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(+)$	tBB	Ano	1,35	O
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial		t/m ³	0,356	O
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m ³	0,5	O
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(+\rho)$	tRho	ano	2,1	O

U = unidade; D = diâmetro; PPL = produção primária líquida; Soil class = item de inicialização do 3-PG relacionado com a disponibilidade de água no solo, nesse caso, o valor zero indica não haver limitação hídrica pelo solo e foi utilizado no procedimento de calibração; cl = indica a classe textural do solo (argiloso) que foi utilizado para validação do 3-PG; PPB = produção primária bruta; O = observado; L = literatura; P = Padrão (modelo original) e A = ajustado; *Valores adotados para Rio Doce; **Valores adotados para Cocais

2.6.3. Calibração

Para calibração do modelo, aplicou-se a equação do índice melhor ajustado com os dados de IAP. Coletou-se os valores para mês de fevereiro em que foi realizado o inventário de todas as parcelas amostrais.

2.7. Análise estatística

A análise de resíduos da estimativa do modelo 3PG foi verificada por meio do erro absoluto médio (EAM), e a raiz do erro quadrático médio (REQM), o erro absoluto médio (EAM %) e raiz do erro quadrático médio (REQM %) conforme as seguintes equações:

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |Pi - Oi|}{n} \quad (7)$$

$$REQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$EAM (\%) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|Pi - Oi|}{n}}{\sum_{i=1}^n \frac{Pi}{n}} \times 100 \quad (9)$$

$$REQM (\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{Pi}{n}} \times 100 \quad (10)$$

em que: Pi é o *i-esimo* valor estimado; Oi o *i-esimo* valor observado; O é o valor médio observado e N o número de dados analisados.

A localização da área experimental e seqüencial das atividades desencadeadas neste estudo pode ser visualizada no fluxograma experimental apresentado na Figura 1.

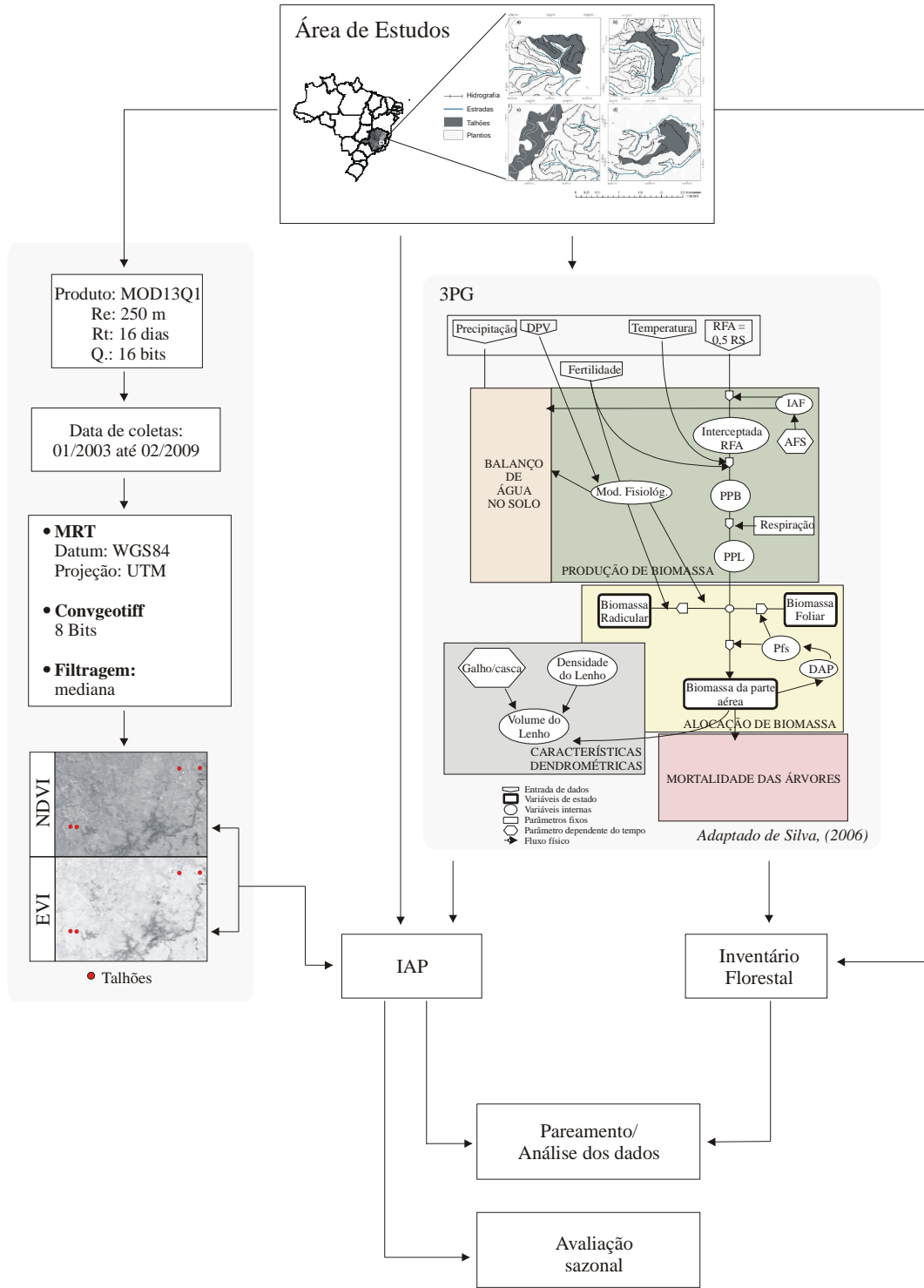


Figura 1. Fluxograma da metodologia proposta detalhando os submodelos utilizados do 3PG e o processamento dos IV's.

3. Resultados e Discussão

Observa-se uma boa relação do NDVI e EVI com os dados de IAP (Figura 2) sendo o primeiro índice melhor correlacionado ($p < 0,05$). Verifica-se que em geral, as coletas realizadas no período de janeiro, estação úmida, se concentraram acima da tendência média nos dados de NDVI, sendo este comportamento um indicativo da resposta do incremento foliar do eucalipto frente à sazonalidade climática.

Observa-se que o EVI apresentou valores constantes próximos a 0,5 em todos os talhões no período chuvoso, ou seja, mesmo com a variação presente do IAP medido a campo, esta imagem não variou a reflectância. Este comportamento poderia refletir uma condição de nebulosidade presente nesta época, porém existe a possibilidade de ruído da imagem visto que o NDVI, presente também no sensor MODIS, não apresentou este mesmo comportamento.

Geralmente, os IV's aproximam-se de um nível de saturação com um comportamento assintótico em regiões de alta biomassa por um determinado valor de IAF (Sellers, 1985). O ponto de saturação na curva exponencial dos dados não foi detectado para as idades trabalhadas. Boer et al., (2008), em estudo realizado com imagens NDVI do sensor ETM+/Landsat-7 em florestas de *E. marginata* na Austrália, obteve o mesmo comportamento, com a dispersão crescente dos dados NDVI para um IAF de até 3,5, conforme observado neste trabalho. Xavier e Vettorazzi não encontraram saturação para o eucalipto utilizando as imagens deste mesmo sensor. Huete, (2002) encontrou saturação em florestas tropicais com valores do índice de 0,85 e 0,7 para o NDVI e EVI do sensor MODIS respectivamente e 0,4 para o bioma do cerrado por meio de análise de histograma destes índices.

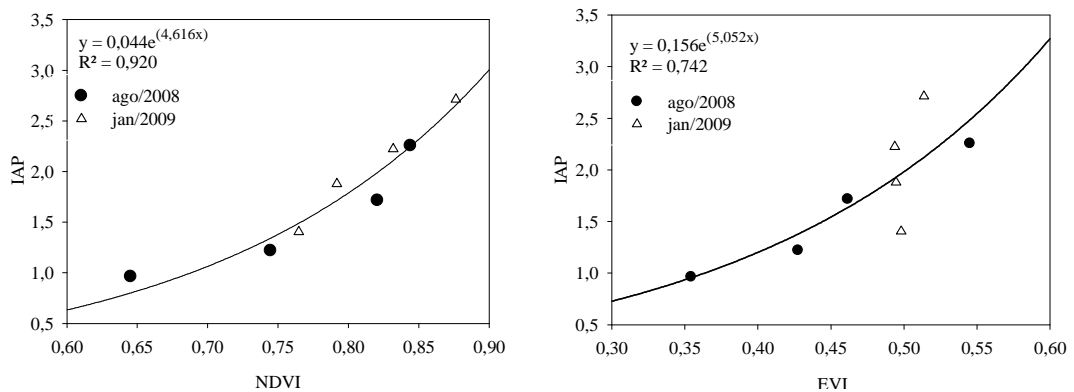


Figura 2. Diagrama de dispersão do IAP com os índices de vegetação EVI e NDVI e seus respectivos modelos de regressão e coeficiente de determinação (R^2) em dados médios dos talhões nas estações secas e chuvosas.

As médias dos valores mensais dos IV's das regiões de Cocais e Rio Doce são apresentadas juntamente aos balanços hídricos sobrepostos destas regiões na Figura 3.

Observa-se que os IV's apresentam em geral, maior reflectância em Cocais. Esta resposta pode ser devido à maior disponibilidade hídrica em conjunto com menores temperaturas presentes neste sítio resultando em um aumento de biomassa foliar. A temperatura pode cooperar com um ganho no balanço de carbono das plantas com a respiração reduzida e um conseqüente aumento da produtividade observado pelo maior incremento foliar em relação à região de menores altitudes.

A partir do mês de maio, verifica-se o início do déficit hídrico nas duas regiões. A diminuição gradual da reflectância verificada nos dois IV's é uma provável conseqüência da água armazenada no solo ainda disponível à planta. Souza et al., (2006), em estudos realizados em plantios de eucalipto próximos à área deste estudo, verificaram que nos meses de março a outubro o armazenamento de água atingiu valores mais baixos, devido a precipitação e a demanda evaporativa do local, sendo que as características físicas do solo, não avaliadas neste estudo também interferem nesta resposta.

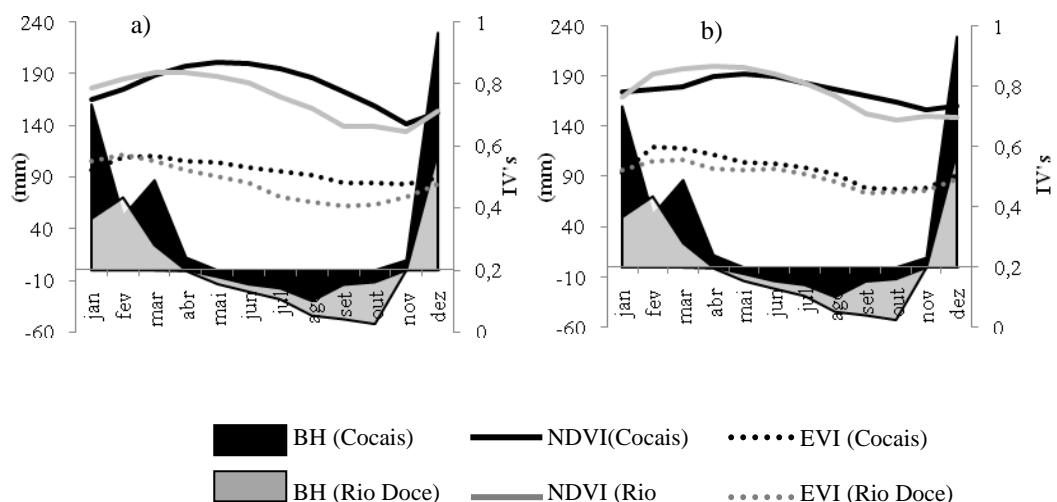


Figura 3. Sobreposição do balanço hídrico (BH) das regiões de altitudes maiores (Cocais) e menores (Rio Doce) e as médias dos valores mensais dos IV's destas regiões nas idades de (a) 58 meses e (b) 32 meses.

As estimativas do modelo 3PG calibrado pelas imagens NDVI apresentam comportamento semelhante aos dados coletados em campo (Figura 4): maiores valores para os clone 372 localizado em Cocais e de IAF nos talhões de 32 meses. Estes resultados confirmam os valores de reflectancia dos IV's descritos anteriormente.

A variação da quantidade de folhas nos períodos seco e úmido observada pelas medidas do LAI-2000 foi detectada pelo modelo 3PG nas duas idades trabalhadas. A eficiência de conversão da radiação em biomassa foliar, verificada na estação chuvosa, é principalmente influenciada pela disponibilidade de água e de nutrientes. O aumento do fornecimento destes fatores, além do ponto de deficiência, tende a aumentar a produção até que se atinja um nível ótimo (Marschner, 1997).

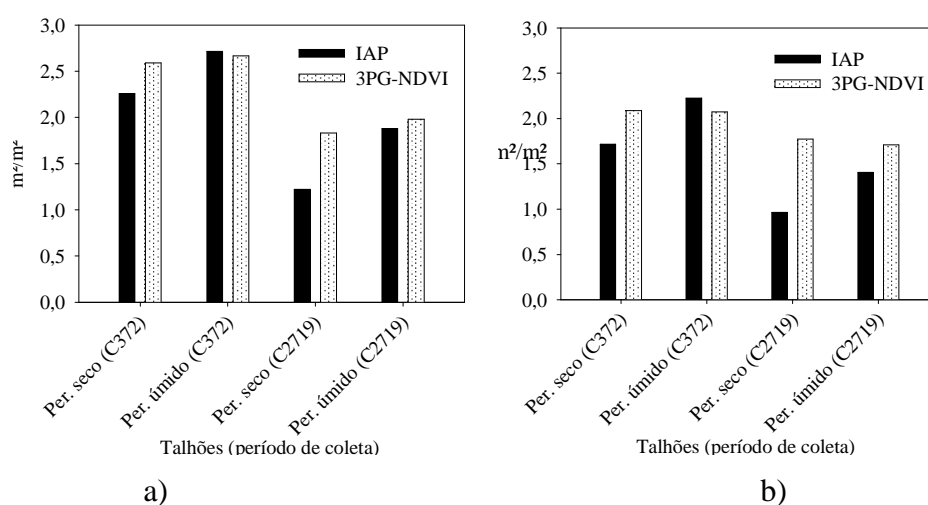


Figura 4. IAP medido a campo e estimativas do IAF pelo modelo 3PG em plantios de eucalipto de idades de 32 meses (a) e 58 meses (b) em períodos secos e chuvosos.

As estimativas das variáveis de saída do 3PG relativas aos dados de IMA, DAP, e volume e os respectivos valores provenientes do inventário florestal são apresentadas na Figura 5. O modelo apresentou em geral, uma subestimativa aos dados observados e boas respostas visto que as tendências nas amplitudes de valores são acompanhadas nas distintas idades e épocas.

Nas estimativas do DAP e IMA, a idade de 58 meses apresentou maiores valores para Cocais e Rio Doce em comparação à menor idade (32 meses). O ritmo

de crescimento ou a função da taxa de variação da matéria seca sintetizada com a idade depende de fatores genéticos (espécie/variedade), técnicas de cultivo, edáficos e climáticos (Conkey, 1976). A relação direta da idade na incorporação de biomassa é representada pelo modelo desenvolvido por Santana et al., (2008) para a estimativa de biomassa em cultivos de Eucalipto.

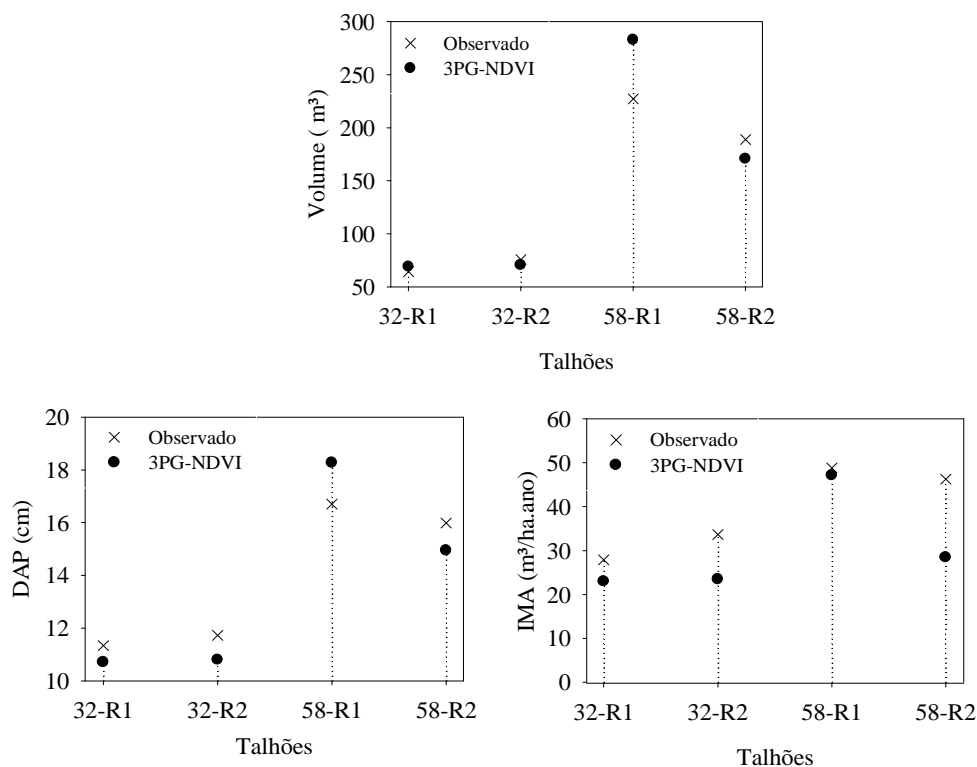


Figura 5. Dados médios por talhão das variáveis obtidas do inventário florestal (Volume, DAP e IMA) e as estimativas destas variáveis pelo modelo 3PG nas regiões de Cocais (C) e Rio Doce (RD) em plantios de eucalipto de 32 e 58 meses.

Verifica-se que o IAF obteve um erro médio absoluto de 0,3 (Tabela 4). Os outliers são evidenciados na análise da raiz do erro quadrático médio, assim, esta variável apresentou maior dispersão em torno da média dos dados se comparadas às demais em termos percentuais. O DAP foi a variável melhor estimada com erros absolutos de 0,32 cm (subestimado) e menores erros percentuais observados.

A Tabela 4 contém as informações estatísticas relacionadas às estimativas do IAF, objeto central deste estudo, IMA, DAP e Volume por meio do modelo 3PG. Os valores dos erros são apresentados na unidade já citada de cada uma das variáveis e em dados percentuais.

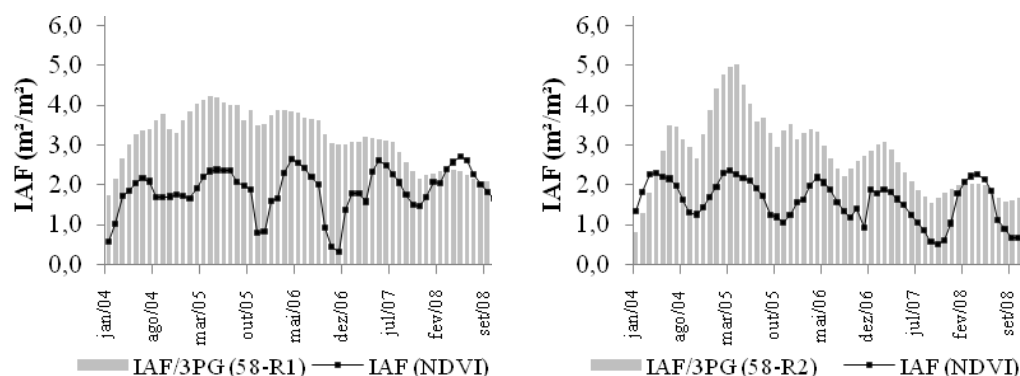
Tabela 4. Análise de resíduos entre as variáveis estimadas pelo modelo 3PG e observadas a campo por meio do inventário florestal.

	EMA	EMA (%)	REQM	REQM (%)	r ²
IAF	0,30	16,78	0,46	25,70	0,76
IMA	8,94	22,86	12,80	21,42	0,57
DAP	0,32	2,33	1,34	6,30	0,90
Volume	7,33	5,28	35,44	16,69	0,90

* Coletas realizadas para os quatro talhões nas duas épocas

A Figura 6 mostra os dados mensais do IAF estimado pela equação do NDVI e pelo 3PG após um ano de plantio nas duas idades. As estimativas do NDVI encontram-se homogêneas com curvas indicando certa simetria que se apresenta um pouco menos evidente apenas na idade de 58 meses em R1. Os valores de IAF do NDVI encontram-se subestimados em relação aos do 3PG repetindo o comportamento visto com a resposta do modelo aos dados de campo. Uma boa estimativa temporal é verificada no modelo seguindo as tendências do incremento de IAF nos períodos correspondentes ao da estimativa do NDVI.

O padrão fenológico revelado neste estudo sugere que o início da estação de crescimento das florestas de eucalipto seja próximo ao mês de janeiro com picos entre março e maio. A substituição das folhas velhas pelas jovens que geralmente possuem alta concentração de clorofila, aumenta a capacidade fotossintética do dossel (Kitajima et al., 1997) e um conseqüente aumento de biomassa.



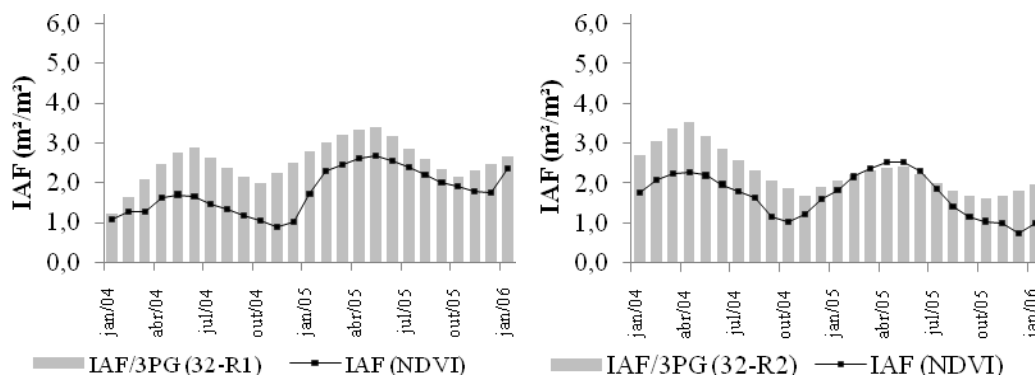


Figura 6. IAF estimado pelo modelo 3PG e pelo NDVI-MODIS nas idades trabalhados para as duas regionais.

Os resultados deste estudo atenderam as expectativas da metodologia proposta. Sugere-se a realização de medições sazonais de IAF em talhões que contemplem todo o ciclo de corte do eucalipto para uma equação de ajuste melhor representativa com os IV's. Devem ser realizadas ainda, simulações para plantios próximos buscando uma distancia limite em que se identifiquem condições homogêneas do sítio para se utilizar a equação gerada com bons resultados.

4. Conclusões

O NDVI foi o índice melhor correlacionado ao IAP coletado a campo. Os IV's foram sensíveis às distintas idades e à sazonalidade dos clones;

O modelo 3PG, calibrado pelo NDVI apresenta boa estimativa do IAF com os dados observados (IAP e inventário) e temporal verificada pelos dados IV's-MODIS;

A região de maior altitude apresentou maiores valores de IAP, o que parece ser devido às condições climáticas presentes neste sítio (menores temperaturas e déficit hídrico). Este padrão de resposta foi verificado pelos IV's e o modelo 3PG;

A metodologia gerada para a calibração do modelo 3PG por meio dos IV's é executável, uma vez que apresentou resultados satisfatórios ao objetivo proposto, ou seja, ter uma ferramenta de boa resolução espacial e temporal, resultando em ganhos importantes para a calibração de modelos de crescimento.

5. Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v.193, p.179-195, 2004.
- AMARAL, A.; SALAS, G.R.; PÁSCOA, F.; TOMÉ, M.; TOMÉ, J.A.; SOARES, P. Application of the forest growth model 3-PG to eucalyptus globulus stands in the central region of Portugal. **In: XXII IUFRO World Congress “Forests in balance: linking tradition and technology”**.8-13 Agosto. Briston, Australia. 2005.
- ARAI, E. **Convgeotiff**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos). Comunicação pessoal. 2002.
- ARES, A.; FOWNES, J. H. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. **Forest Ecology and Management**, v.139, p. 227-236, 2000.
- BOELMAN, N. T.; Stieglitz, M. Rueth, H. M.; Sommerkorn, M.; Griffin K. L.; Shaver, G. R. Gamon, J. A. Response of NDVI, biomass, and ecosystem gas exchange to long-term warming and fertilization in wet sedge tundra. **Oecologia**, v. 135, p. 414–421. 2003.
- BOER, M. M.; MACFARLANE, C.; NORRIS, J.; SADLER, R. J.; WALLACE, J.; GRIERSON, P. F. Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely-sensed changes in leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 4358–4369, 2008.
- BONAN, G. B. The Land Surface Climatology of the NCAR Land Surface Model coupled the NCAR Community Climate Model. **Journal of Climate**, v.11, p. 1307–1327, 1998.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.
- CARNEIRO, R. L. de C.; RIBEIRO, A.; HUAMAN, C. A. M.; LEITE, F. P.; SEDIYAMA, G. C.; BARROS, N. F. de Consumo de água em plantios de eucalipto: parte 2 - Determinação da condutância estomática em tratamentos irrigado e não-irrigado. **Revista Árvore**, v.32, n.1, p.1-10, 2008.
- CHAVES, R. A. ; REIS, M. G. F. ; REIS, G. G. ; PEZZOPANE, J. E. M. ; XAVIER, A. ; MONTE, M. A. Dinâmica de cobertura de dossel de povoamentos de clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex-Maiden submetidos a desrama artificial e desbaste. **Revista Árvore**, v. 32, p. 989-998, 2007.
- CHUVIECO, E.; COCERO, D.; RIAÑO, D.; MARTIN, P.; MARTÍNEZ-VEGA, J.; RIVA, J. D. L.; et al. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of

- live fuels moisture content in forest fire danger rating. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p.322–331, 2004.
- CLEUGH, H.A.; LEUNING, R.; MU, Q.; RUNNING, S.W. Regional evaporation estimates from flux tower and MODIS satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v.106 (3), p.285–304, 2007.
- CONKEY, L.E. Response of tree-ring to climate in Maine, **Tree-ring Bulletin**, v.39, p. 29-38, 1976.
- COOPS, N C. T.; BLACK, A.; JASSAL, R. P. S.; TROFYMOW J.A.T.; MORGENSTERN, K. Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. **Remote Sensing of Environment**, v.107, p.385–40, 2007.
- COOPS, N.C.; WARING, R.H.; LANDSBERG, J.J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management**, v.104, p.113– 127, 1998.
- DEERING, D.W.; ROUSE J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. In: International Symposium on Remote Sensing of Environment, 10., Ann Arbor, 1975. **Proceedings**, University of Michigan, v.2, p. 1169-1178, 1975.
- DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. **Biosphere –Atmosphere Transfer Scheme (BATS)** for the NCAR CCM, NCAR/TN-275-STR. Boulder, CO: NCAR Research. 1986.
- DYE , P.J.; JACOBS , S.; DREW , D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve *Eucalyptus* plantations stands in Zululand, South Africa . **Forest Ecology and Management**, v. 193 , p.197 – 218, 2004.
- ESPREY, L.J.; SANDS, P.J. Parameterisation of 3-PG for *Eucalyptus grandis* Plantations in the Summer Rainfall Regions of South Africa, ICFR Bulletin05/2004. **Institute for Commercial Forestry Research**, Pietermaritzburg,South Africa. 2004.
- FOODY, G. M.; CUTLER, M. E.; MCMORROW, J.; PELZ, D.; TANGKI, H.; BOYD, D. S.; DOUGLAS, I. Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. **Global Ecology & Biogeography**, v. 10, p. 379–387, 2001.
- GAMON, J. A.; FIELD, C. B.; ROBERTS, D. A.; USTIN, S. L.; VALENTINI, R. Functional patterns in an annual grassland during an AVIRIS overflight. **Remote Sensing of Environment**, v.44, p.239–253, 1993.
- GUERSCHMAN, J. P.; VAN DIJK, A. I. J. M.; MATTERS DORF, G.; BERINGER, J.; HUTLEY, L. B.; LEUNING, R.; PIPUNIC, R. C.; SHERMAN, B. S. Scaling of potential evapotranspiration with MODIS data reproduces flux

observations and catchment water balance observations across Australia. **Journal of Hydrology**, v.36, p.9107–119, 2009.

HEINSCH, F. A.; ZHAO, M.; RUNNING, S. W.; KIMBALL, J. S.; NEMANI, R. R.; DAVIS, K. J. Evaluation of remote sensing based terrestrial productivity from MODIS using regional tower eddy flux network observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, p.1908–1925, 2006.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, p. 295–309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODREIGUEZ, E.P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing. Environment**, v. 83, p.195–213, 2002.

JOHNSEN, K.; SAMUELSON, L.; TESKEY, R.; MCNULTY, S.; FOX, T. Process models as tools in forestry research and management. **Forest Science**, v.47, p.2-8, 2001.

JUSTICE, C.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R.; DEFRIES, D. R.; D. H.; SALOMONSON, V.; PRIVETTE, J.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R.; KNJAZIHHIN, Y.; RUNNING, S.; NEMANI, R.; WAN, Z.; HUETE, A.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R.; GIGLIO, L.; MULLER, J.; LEWIS, P.; BARNESLEYTHE, M. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, p.1228–1249, 1998.

KITAJIMA, K.; MULKEY, S. S.; WRIGHT, S. J. Decline of photosynthetic capacity with leaf age in relation to leaf longevities for five tropical canopy tree species. **American Journal of Botany**, v. 84, p. 702–708. 1997.

LANDSBERG, J. J.; E WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v.95, p.209-228, 1997.

LEUNING, R.; ZHANG, Y. Q.; RAJAUD, A.; CLEUGH, H. A.; TU, K. A. simple surface conductance model to estimate regional evaporation using MODIS leaf area index and the Penman-Monteith equation. **Water Resources Research** v.44 , 2008.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**, Second Edition. San Diego, Academic Press Inc. 889p. 1997.

MONTE, M. A.; REIS, M. G. F.; REIS, G. G.; LEITE, H. G. STOCKS, J. J. Métodos indiretos de estimação da cobertura de dossel em povoamentos de clone de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v.42, n.6, p.769-775, 2007.

MU, Q.; HEINSCH, F.A.; ZHAO, M.; RUNNING, S.W. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data. **Remote Sensing of Environment**, v.111 (4), p.519–536, 2007.

NIGHTINGALE, J.M.; COOPS, N.C.; WARING, H.; HARGROVE W.W.
Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the U.S.A. with those generated by a simple process model, 3-PGS. **Remote Sensing of Environment**, v.109, p. 500–509, 2007.

NIGHTINGALE, J.M.; HILL, M.J.; PHINN, S.R.; DAVIES, I.D.; HELD, A.A.; ERSKINE, P.D. Use of 3-PG and 3-PGS to simulate forest growth dynamics of Australian tropical rainforests I. Parameterisation and calibration for old-growth, regenerating and plantation forests. **Forest Ecology and Management**, v.254, p. 107–121, 2008.

PAUL, K.I.; BOOTH, T.H.; JOVANOVIĆ, T.; SANDS, P.J.; MORRIS, J.D. Calibration of the forest growth model 3-PG to eucalypt plantations growing in low rainfall regions of Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 243, p. 237–247, 2007.

PEARSON, R.L.; MILLER, L.D. Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. **In: International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor. University of Michigan. p. 1357–1381. 1972.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, v. 1, 127 p. ISBN 978-85-60507-02-3. 2007

RODRÍGUEZ, R.; REAL, P.; ESPINOSA, M.; PERRY, D. A. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. **Forestry**, v. 82, n.2, p.149-162, 2009.

SANDS, P.J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. **Forest Ecology and Management**, v.163, p.273–29, 2002.

SANTANA, R.C.; BARROS, N.F.; LEITE, H. G. COMERFORD, N. B.; NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, v.32, n.4, p.697-706, 2008.

SELLERS, P. J.; RANDALL, D. A.; COLLATZ, G. J.; BERRY, J. A.; FIELD, C. B.; DAZLICH, D. A., ET AL. A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. **Journal of Climate**, v.9, p.706–737. 1996.

SILVA, G. G. C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 102f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P. ; MINUZZI, R. B. Relação entre disponibilidade hídrica e produtividade do eucalipto em diferentes idades, em Guanhães, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 629-638, 2006.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D.. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis-urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, v.193, p. 219–234, 2004.

STENBERG, P., NILSON, T., SMOLANDER, S., VOIPIO, P. Gap fraction based estimation of LAI in scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v 29, p.363–370. 2003.

WALTER-SHEA, E. A.; PRIVETTE, J.; CORNELL, D., MESARCH, M. A.; HAYS, C. J. Relations between directional spectral vegetation indices and leaf area and absorbed radiation in alfalfa. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p.162-177, 1997.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, p. 41-76, 1947.

WHITE, J.D.; COOPS, N.C.; SCOTT, N.A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. **Ecol. Model**, v.131, p175–190, 2000.

WYLIE, B. K.; MEYERA, D. J.; TIESZENB, L. L.; MANNEL, S. Satellitemapping of surface biophysical parameters at the biome scale over the North American grasslands, a case study. **Remote Sensing of Environment**, v.79, p.266–278, 2002.

XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Mapping leaf area index through spectral vegetation indices in a subtropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 9, p. 1661-1672, 2004.

ZHANG, Y.Q.; CHIEW, F.H.S.; ZHANG, L., LEUNING, R.; CLEUGH, H.A. Estimating catchment evaporation and runoff using MODIS leaf area index and the Penman-Montheith equation. **Water Resources Research**, in press, doi:10.1029/2007WR006563. 2008.

CONCLUSÕES GERAIS

Dos métodos indiretos utilizados para a estimativa do IAF, o LAI2000 apresentou melhor correlacionado com a análise destrutiva em relação às fotografias hemisféricas.

Menores valores de IAF foram verificados na época seca do ano, indicando que este índice tem variação sazonal ao longo do ano. Este comportamento também foi observado pelos instrumentos óticos indicando boas medidas de IAF.

O rendimento dos talhões da região de maior altitude (Cocais) superou os talhões da região mais baixa (Rio Doce) em IAF. A maior demanda evapotranspirativa em Rio Doce devido à maior disponibilidade energética presente pode ser um fator de importância na resposta do incremento foliar reduzido, observado neste sítio.

Os valores da correção da radiação em superfícies inclinadas apresentaram-se, na maior parte do ano, maior radiação solar incidente nas faces nortes como consequência principal do ângulo dos raios solares em relação a este tipo de face de exposição do terreno.

Foram encontrados maiores valores medidos de IAF pelo sensor LAI2000 e de IAF estimados pelo modelo 3PG na face de exposição norte, embora somente o talhão de Cocais tenha apresentado diferenças significativas ($p < 0,05$). Nesta face também foram verificados maiores valores para outras variáveis estimadas que expressam a produtividade do plantio.

O modelo 3PG, calibrado pelo NDVI, índice melhor correlacionado ao IAF coletado a campo, apresenta boa estimativa dos dados observados e temporal verificada pelos dados IV's-MODIS.

A metodologia gerada para a calibração do modelo 3PG por meio dos IV's é útil, uma vez que apresentou resultados satisfatórios.