

## Uso de sensoriamento remoto na estimativa do índice de área foliar em *Eucalyptus*

Clayton Alcarde Alvares<sup>1</sup>  
Eduardo Moré de Mattos<sup>2</sup>  
Otávio Camargo Campoe<sup>3</sup>  
Ana Heloisa Carnaval Marrichi<sup>4</sup>  
José Luiz Stape<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dpt of Forestry and Environmental Resources – North Carolina State University – NCSU  
3108 Jordan Hall, Campus Box 8008, 2800 Faucette Dr., Raleigh, NC, USA 27695  
{calcard, jlstape}@ncsu.edu

<sup>2</sup> Dpto de Ciências Florestais – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ,  
Univesidade de São Paulo – USP  
Av. Pádua Dias, 11 – CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil  
more.mattos@yahoo.com.br

<sup>3</sup> Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF  
Av. Comendador Pedro Morganti, 3500 – CEP 13415-000, Piracicaba, SP, Brasil  
otavio@ipef.br

<sup>4</sup> Duratex S/A  
Rod. Marechal Rondon, km 323 – CEP 17120-000, Agudos, SP, Brasil  
ana.marrichi@duratex.com.br

**Abstract.** The use of vegetation indices to estimate Leaf Area Index (LAI) has been used mostly in commercial plantings *Eucalyptus*, but not at the experimental areas. The objectives of this study were: i) use of RapidEye sensor images to estimate LAI of *Eucalyptus* clones in an experimental area; ii) to check whether the red-edge band of satellite RapidEye, in vegetation indices, improves the LAI estimations. We used a ceptometer to measure LAI of 11 clones (plots) in a *Eucalyptus* trial of Project TECHS, at Estrela do Sul (Minas Gerais state, Brazil), to confront them with the vegetation indices NDVI, SR, NDVI<sub>edge</sub>, SR<sub>edge</sub>, these being last two with the use of red-edge band. The vegetation indices were efficient in estimating LAI of the different *Eucalyptus* clones. The red-edge band increased the accuracy of estimating equations of the LAI when used in the vegetation indices NDVI<sub>edge</sub> and SR<sub>edge</sub>.

**Palavras-chave:** índice de vegetação, red-edge band, ceptômetro, plantações florestais, silvicultura de precisão

### 1. Introdução

As plantações de *Eucalyptus* no Brasil têm se expandido ao longo dos anos (Gonçalves et al., 2013). Os estudos da ecologia da produção têm mostrado que a produção de biomassa da parte aérea da floresta (principalmente do fuste) está diretamente relacionada ao índice de área foliar (IAF) e conseqüentemente à absorção de radiação. A necessidade de estimar as características biofísicas da floresta, monitorar seus estoques de carbono em grande escala e, além disso, conhecer detalhadamente o dossel florestal tem requerido a aplicação de modelos ecofisiológicos e a utilização do sensoriamento remoto (Alvares et al., 2013). No Brasil, o uso de índices de vegetação para estimar o IAF tem sido utilizado, na sua maioria, em plantios comerciais de *Eucalyptus*, e não em áreas experimentais. Geralmente, em áreas comerciais, em comparação às experimentais, há muitos outros fatores envolvidos na produtividade, como maiores falhas de plantio, mortalidade, problemas nutricionais e presença de sub-bosque (mato competição). Assim, os objetivos deste trabalho foram: i) utilizar imagens do sensor RapidEye para estimar o IAF de clones de *Eucalyptus* em uma área experimental; ii) verificar se o a banda vermelho-edge do RapidEye, em índices de vegetação, melhora a estimativa do IAF.

## 2. Metodologia de Trabalho

### 2.1 Plataforma TECHS e caracterização da área de estudo

O programa cooperativo do IPEF, Tolerância de *Eucalyptus* Clonais aos Estresses Hídricos, Térmicos e Biológicos - TECHS ([www.ipef.br/techs](http://www.ipef.br/techs)), utiliza uma rede de 36 sítios experimentais (do norte do Pará até o Uruguai), é composto por 18 clones de eucalipto com manipulação do regime hídrico e espaçamento de plantio (Stape et al., 2014), e abrange ampla variedade climática (Alvares et al., 2013) (Figura 1a). Cada TECHS é composto por um ensaio clonal plantado no espaçamento 3 x 3 m, sendo uma parcela de 8 linhas por 10 plantas (720 m<sup>2</sup>), e um ensaio de espaçamento com arranjo de 7 linhas (3 m entre-linhas) por 27 plantas, conjunto que simula densidade de árvores variando de 476 a 13.333 arv ha<sup>-1</sup>.

O presente estudo selecionou o sítio de Estrela do Sul (MG), o qual tem 11 clones do projeto TECHS, em ambos os ensaios (Figura 1b). O experimento foi implantado em novembro de 2011 e aos 2 anos, em outubro de 2013, apresentava elevada e ampla faixa de produtividade, boa uniformidade, reduzido número de falhas e baixa mortalidade (Tabela 1). A área experimental recebeu silvicultura e manejo para garantir um crescimento livre de limitações nutricionais e de mato competição (Figura 2).

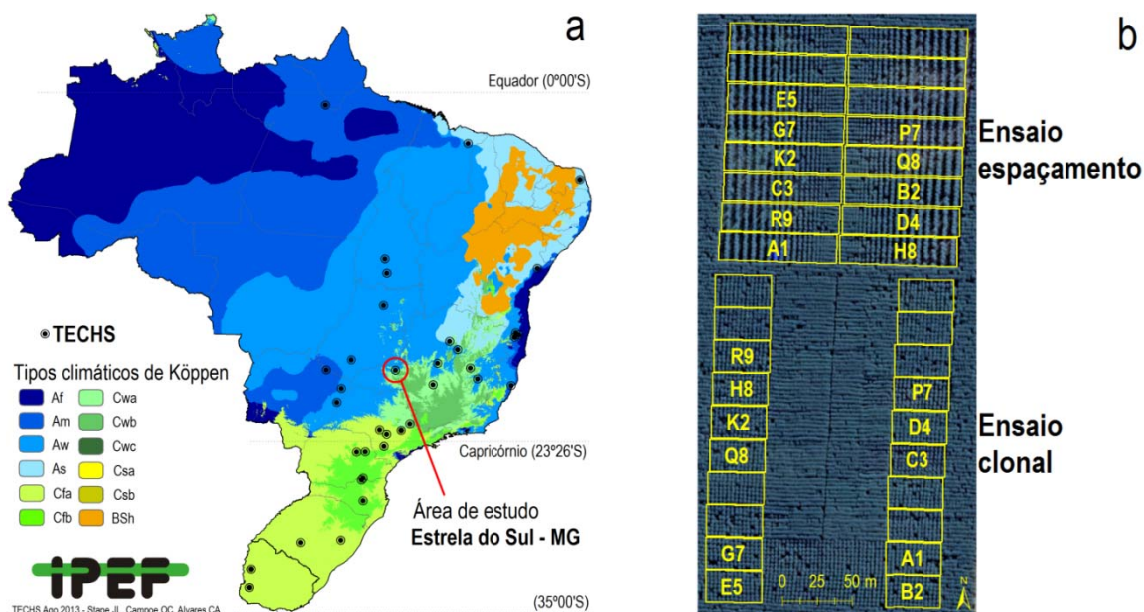


Figura 1. Localização dos sítios experimentais do programa TECHS/IPEF, com destaque para a área de estudo do presente trabalho, Estrela do Sul (MG). Zoneamento climático de Köppen modificado de Alvares et al. (2013) (a). Croqui e identificação das parcelas e clones estudados em Estrela do Sul; parcelas plotadas sobre uma imagem GeoEye de maio de 2013(b).

### 2.2 Atividades de campo e mensuração do IAF

A estimativa do índice de área foliar de cada uma das 11 parcelas (clones) foi realizada com base na radiação PAR (radiação fotossinteticamente ativa – 400 a 700 nm) transmitida através do dossel e da radiação incidente acima do dossel. Essas variáveis foram mensuradas com o uso do ceptômetro (Accupar LP80, Decagon). Em cada parcela foi coletada a radiação em 6 pontos diferentes, sendo 3 na linha e 3 na entre-linha de plantio, e em cada ponto foram tomadas 4 medições (norte, sul, leste, oeste), totalizando assim 24 valores de radiação por parcela. Todas as leituras de radiação foram realizadas em 15/10/2013, entre às 11:30 e 13:00 h. Em todas as medições o ceptômetro foi nivelado a 1 m acima do solo. Entre uma parcela e outra era tomada a radiação incidente acima do dossel, neste caso uma área externa à plantação aonde a radiação chegasse diretamente até o aparelho (Figura 3).

Tabela 1. Caracterização biométrica dos 11 clones de Estrela do Sul em outubro de 2013.

Clone	Área basal m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup>	Volume madeira (com casca) m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	PV50 %	Falha %	Mortalidade %
A1	9,3	62,6	41	2,5	1,3
B2	10,3	68,2	41	3,8	0
C3	7,5	39,9	36	2,5	2,5
D4	8,0	45,9	36	0	3,8
E5	9,3	60,3	39	8,8	0
G7	6,6	34,4	37	6,3	0
H8	8,2	50,6	35	0	0
K2	70,	39,7	34	6,3	0
P7	4,6	20,6	37	2,5	2,5
Q8	6,4	34,6	36	1,3	2,5
R9	7,5	49,1	30	10	0

PV50 = porcentagem acumulada do volume de madeira das 50% menores árvores plantadas, incluindo falhas

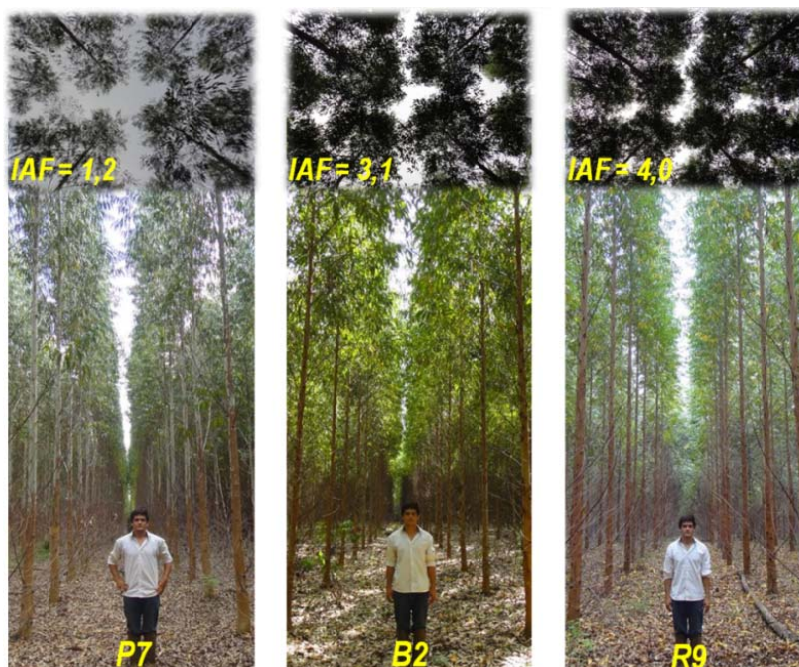


Figura 2. Parcelas e dossel dos clones P7, B2, R9. Notar a ausência de mato na área de estudo.



Figura 3. Uso do ceptômetro na coleta da radiação PAR incidente.

A equação utilizada pelo Accupar LP-80 para derivar o IAF (Eq. 1) computa os efeitos da condição do céu no momento da aquisição dos dados, efeitos da arquitetura do dossel da cultura de interesse, propriedades ópticas das folhas, além dos efeitos da época do ano e hora do dia (direção da radiação incidente sobre o dossel). Isto torna o Accupar LP-80 um aparelho versátil, tendo Hyer e Goetz (2004) demonstrado que as estimativas de IAF permanecem consistentes sob diferentes condições de coleta.

$$IAF = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K}\right)f_b - 1\right] \ln \tau}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (1)$$

Em que  $f_b$  = fração da radiação PAR que incide na forma direta ( $f_b = 0,898$  em dias de céu completamente limpo),  $\tau$  = fração da PAR observada abaixo do dossel pela PAR observada acima do dossel,  $A$  = polinômio que descreve a absorvância da copa.

$$A = 0,283 + 0,785a + 0,159a^2 \quad (2)$$

em que  $a$  = absorvância da folha na banda PAR ( $a = 0,9$ )

$$K = \frac{\sqrt{X^2 + \tan^2 \theta}}{X + 1,744(X + 1,182)^{-0,733}} \quad (3)$$

em que  $K$  = coeficiente de extinção de luz (Campbell, 1986),  $\theta$  = ângulo zenital em radianos,  $X$  = parâmetro relativo à distribuição dos ângulos de inclinação foliar.

O parâmetro  $X$  é a razão entre o comprimento do semi-eixo horizontal em relação ao comprimento do semi-eixo vertical de um elipsóide e sua relação com o AMI é dada pela Eq. 4 (Wang et al., 2007).

$$X = -3 + \left(\frac{AMI}{9,65}\right)^{-0,6061} \quad (4)$$

em que AMI = ângulo médio de inclinação foliar em radianos.

Para determinação do AMI foram adotados os valores obtidos por Miranda et al. (2014) que coletaram aleatoriamente 30 medidas por terço da copa (divididos proporcionalmente à profundidade da copa) em um total de 6 árvores abatidas por clone, totalizando 180 medidas por terço da copa (Figuras 4 e 5).

O ângulo zenital foi calculado conforme as equações abaixo:

$$\theta = \cos^{-1}(\sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h) \quad (5)$$

em que  $\phi$  = latitude,  $\delta$  = declinação solar,  $h$  = ângulo horário (radianos)

$$\delta = 23,45 \sin \left[ \left( \frac{360}{365} \right) (NDA - 80) \right] \quad (6)$$

em que NDA = número do dia do ano

$$h = 15(t - 12) \quad (7)$$

em que  $t$  = horário da observação (horas)





Figura 4. Determinação do ângulo de inserção das folhas com o uso de transferidor no terço superior da copa (a). Exemplos de ângulo de inclinação foliar (b).

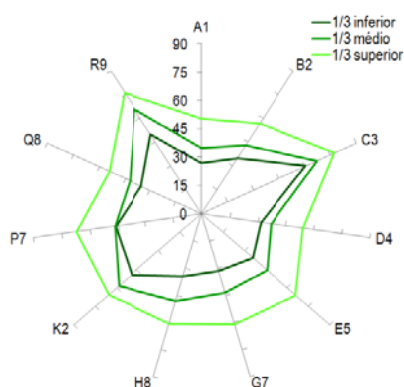


Figura 5. Ângulo médio de inclinação foliar nos terços inferior, médio e superior dos clones estudados.

## 2.3 Imageamento e geoprocessamento

O RapidEye é um satélite multiespectral que apresenta cinco bandas de mesma resolução temporal, com resolução radiométrica de 12 bits (4096 níveis de cinza), e resolução espacial 5 m. Dentre as qualidades do sensor RapidEye, destaca-se a sua banda 4 vermelho-edge centrada em 710 nm (Figura 6).

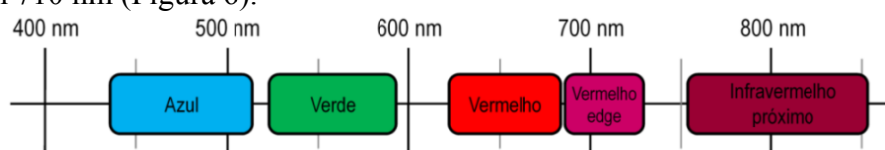


Figura 6. Resolução espectral e bandas do satélite RapidEye. Azul (banda 1): 440 – 510 nm; Verde (banda 2): 520 – 590 nm; Vermelho (banda 3): 630 – 685 nm; Vermelho-edge (banda 4): 690 – 730 nm; Infravermelho próximo (banda 5): 760 – 850 nm

Foi adquirida uma imagem do satélite RapidEye no mesmo mês da campanha de IAF, outubro de 2013. A imagem usada é nível 2 (com correção radiométrica e correção geométrica). Os valores de números digitais foram convertidos em radiância com base na escala radiométrica. A correção atmosférica foi realizada com base no método DOS (Chavez, 1988). Foram calculados dois índices de vegetação, os mais comumente usados em culturas agrícolas e florestais, o SR (Simple Ratio) e o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Eq. 8 e 9) (Jensen, 2009). Dado a banda adicional vermelho-edge do RapidEye, dois novos índices foram propostos, o  $SR_{edge}$  e o  $NDVI_{edge}$ , Eq. 10 e 11, respectivamente. Com base nas quatro imagens resultantes foram obtidos os valores médios dos índices SR, NDVI,  $SR_{edge}$  e  $NDVI_{edge}$ , de cada uma das 11 parcelas/clones do ensaio clonal. Do tamanho total de cada parcela, 720 m<sup>2</sup>, foi considerada apenas a sua área central, de 375 m<sup>2</sup>, correspondente a

15 pixels do RapidEye. Tal restrição foi realizada a fim de evitar a interferência de pixels vizinhos. Por fim, os valores médios dos índices de vegetação foram confrontados com os IAF médios de cada parcela.

$$SR = \frac{IVP}{Vermelho} \quad (8)$$

$$NDVI = \frac{(IVP - Vermelho)}{(IVP + Vermelho)} \quad (9)$$

$$SR_{edge} = \frac{IVP}{Vermelho_{edge}} \quad (10)$$

$$NDVI_{edge} = \frac{(IVP - Vermelho_{edge})}{(IVP + Vermelho_{edge})} \quad (11)$$

### 3. Resultados e Discussão

O IAF médio estimado pelo ceptômetro em todos os 11 clones foi de  $2,45 \text{ m}^2_{folha} \text{ m}^{-2}_{solo}$ . Porém, o IAF variou entre 0,56 e  $4,79 \text{ m}^2_{folha} \text{ m}^{-2}_{solo}$ , sendo esses limites encontrados como valores médios nas parcelas dos clones C3 (híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*) e R9 (*Eucalyptus urophylla*), respectivamente. Foram observadas significativas relações exponenciais ( $p < 0,001$ ) entre o IAF e os índices de vegetação (Figura 7). Ou seja, uma única curva que abrange a variedade de copa dos 11 clones aqui estudados. Destaca-se que, tanto os valores de IAF quanto dos índices de vegetação, foram mensurados no período pós-inverno (outubro/2013), após período de baixa temperatura e fotoperíodo, e com déficit hídrico. Além disso, as árvores contavam com dois anos de idade. O  $R^2$

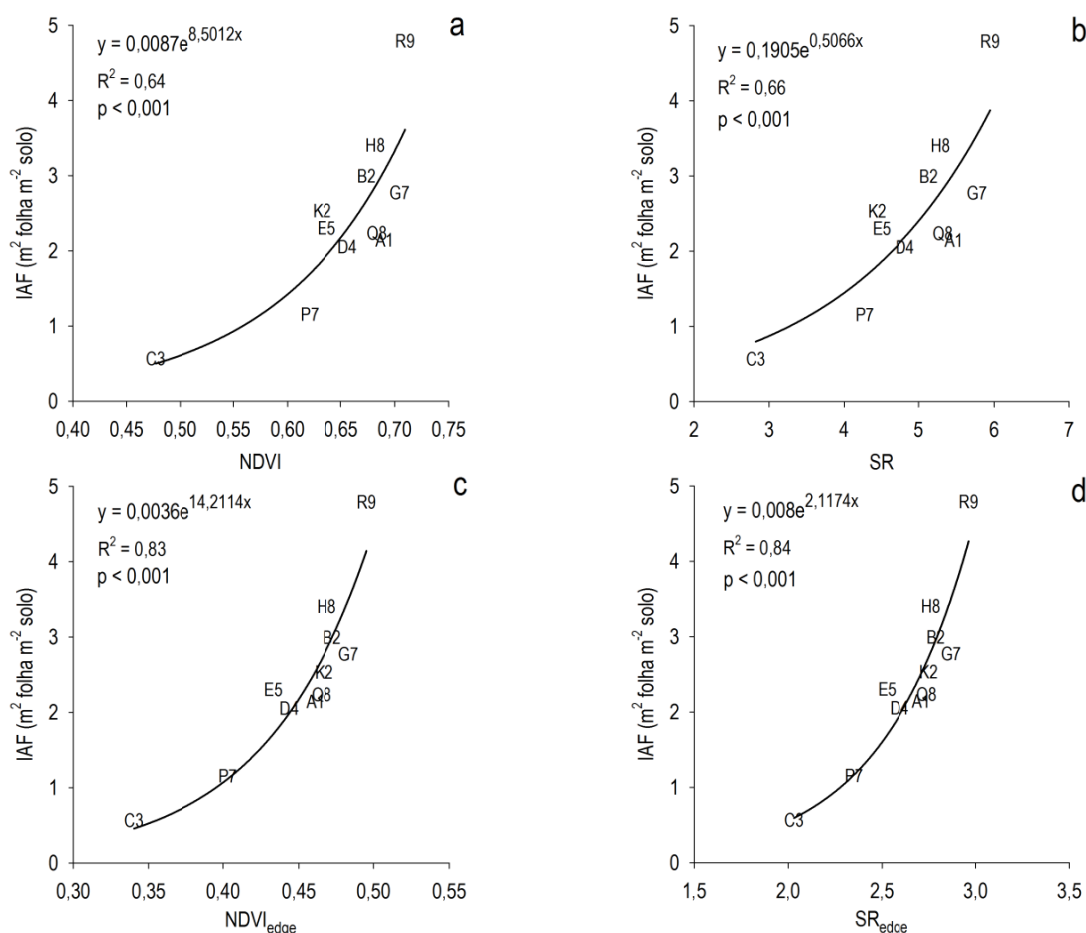


Figura 7. Relação entre o IAF e os índices de vegetação NDVI e NDVI<sub>edge</sub>.

encontrado ficou entre 0,63 e 0,64 nas relações do IAF com os índices de vegetação tradicionais, ou seja, com o uso da banda vermelho e IVP. Porém, quando considerada a banda vermelho-edge nos índices de vegetação, o  $R^2$  saltou para 0,83 e 0,84, respectivamente, no  $NDVI_{edge}$  e  $SR_{edge}$  (Figuras 7c e 7d). Esse ganho de sensibilidade na estimativa do IAF ocorreu, pois a banda vermelha-edge fica na região de mudança abrupta da reflectância foliar, entre 680 e 780 nm, e é influenciada, principalmente, pelo efeito combinado de absorção espectral em comprimentos de onda vermelho e dispersão na região do infravermelho próximo (Cho e Skidmore, 2006). Flores (2009), com base no sensor Landsat, encontrou relação semelhante entre NDVI e IAF para *Pinus taeda*, e relação linear entre índice SR e IAF para a mesma espécie. Paiva (2009) chegou numa relação exponencial semelhante ao presente trabalho para talhões de *Eucalyptus*, com base no sensor MODIS, considerando as duas estações contrastantes do verão e inverno no Vale do Rio Doce (MG). A equação IAF x  $NDVI_{edge}$  (Figura 7c) foi aplicada ao layer  $NDVI_{edge}$ , classificada e sobreposta à uma imagem RGB da área de estudo, onde pode-se notar a intensa variabilidade espacial do IAF entre os diferentes clones de ambos ensaios TECHS (Figura 8a). Como exemplo de utilização direta dos resultados, o arquivo de árvores do ensaio de espaçamento foi interceptado com o mapa de IAF, e assim foi obtido o IAF médio de cada tratamento, ou faixa de espaçamento, deste ensaio. Sabe-se que em ensaios de espaçamento tipo Nelder a variável IAF ainda se constitui um desafio de ser obtida por métodos não destrutivos (ceptômetro, LAI2000, fotos hemisféricas...), porém pode ser usada com sucesso da maneira aqui apresentada (Figura 8b).

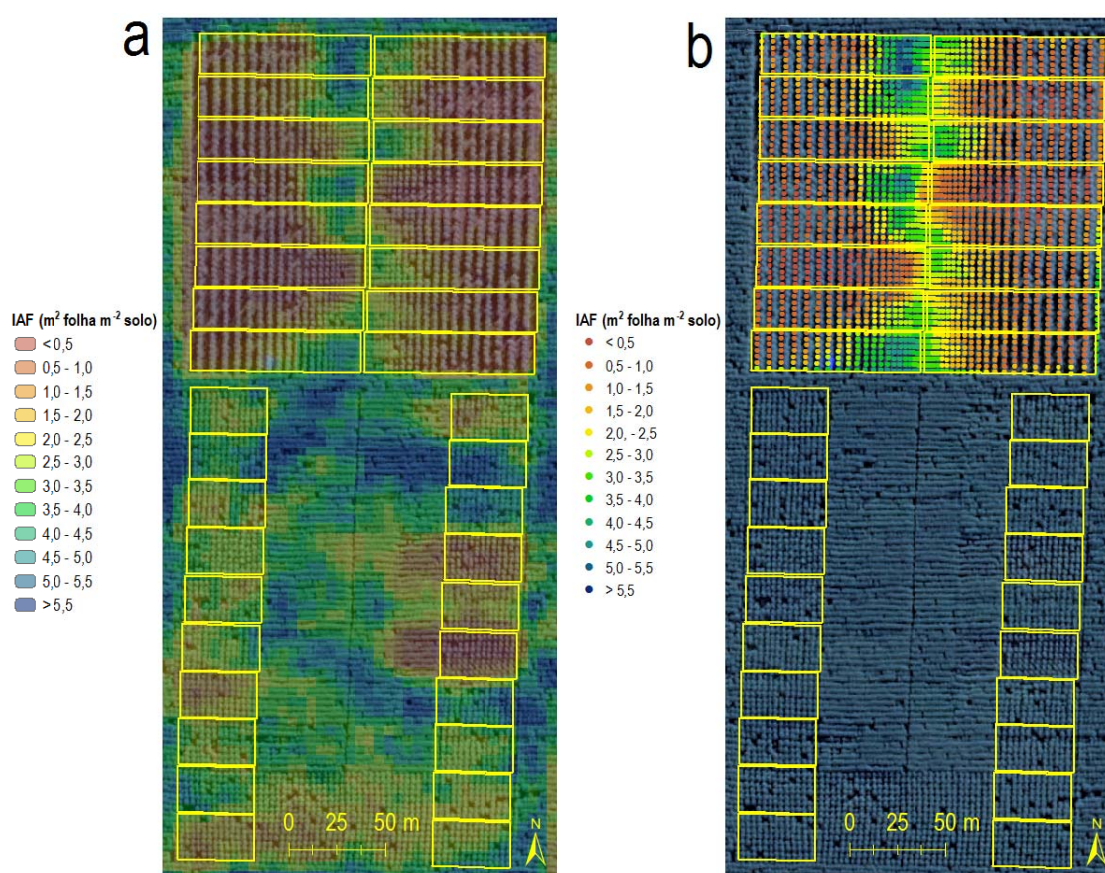


Figura 8. Mapeamento e classificação do IAF em função da equação  $NVI_{edge}$  (a). Extrapolação do IAF, no nível da árvore, em todas as faixas do ensaio de espaçamento (b).

#### 4. Conclusões

No presente estudo, uma área experimental com *Eucalyptus* de 2 anos de idade, livre de mato competição (sub-bosque), e sem limitações nutricionais, os índices de vegetação NDVI e SR

foram eficientes na determinação do IAF de diferentes clones de *Eucalyptus*. A banda vermelho-edge do satélite RapidEye aumentou a precisão das equações estimadoras do IAF quando usada no índices de vegetação NDVI e SR.

### Agradecimentos

Ao projeto TECHS-IPEF e à Duratex S/A pelo fornecimento da imagem de satélite. Aos estudantes de Eng. Florestal (ESALQ/USP) e estagiários do IPEF, Lays Miranda, Giovanna Samesima, Ítalo Cegatta, Jéssica Carmo, Beatriz Gonzalez, Lara Calvo, pelo apoio no trabalho de campo.

### Referências Bibliográficas

Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Moraes, J.L.M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

Alvares, C.A.; Munhoz, J.S.B.; Stape, J.L.; Stahl, J.; Andrade, L.; Santos, G.; Lima, R.; Coutinho, R.T.; Hoinacki, R.; Fox, T.R.. Caracterização da dinâmica dos índices de vegetação NDVI e EVI em plantações de Pinus do Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR. *Anais...* INPE, 2013. p. 2866-2873.

Campbell, G. S. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 36, p. 317 – 321, 1986.

Chavez, P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote sensing of environment*, v. 24, p. 459-479, 1988.

Cho, M.A.; Skidmore, A. K.. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method. *Remote sensing of environment*, v. 101, p. 181-193, 2006.

Flores, F.J. **Using remote sensing data to estimate leaf area index and foliar nitrogen of loblolly pine plantations**. 2003. 115 p. Thesis (Forestry). North Carolina State University, Raleigh, NC, USA. 2003

Gonçalves, J.L.M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F.B., Lima, W.P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 301. p. 6-27, 2013

Hyer, E.J.; Goetz, S.J. Comparison and sensitivity analysis of instruments and radiometric methods for LAI estimation: assessments from a boreal forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 122, p. 157 – 174, 2004.

Jensen, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, 2009. 598 p. (Prentice Hall Series in Geographic Information Science) Tradução de: Remote Sensing of the environment: an earth resource perspective.

Miranda, L.G., Stape, J.L., Mattos, E.M. Determinação do coeficiente de extinção de luz para doze genótipos de *Eucalyptus*. In: Simpósio Internacional de Iniciação Científica da Universidade De São Paulo - Agropecuária - Ciências Florestais, 22, 2014, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: USP, 2014. www.usp.br/siicusp

Paiva, Y.G. **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**. 2009. 62 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

Stape, J.L.; Binkley, D.; Grattapaglia, D.; Campoe, O.; Alvares, C.; Gomes, F.; Mattos, E.; Otto, M.; Hakamada, R.; Moraes, M. T. Fatores hídricos e as decisões de silvicultura, de melhoramento e de proteção na eucaliptocultura. In: Encontro Brasileiro de Silvicultura, 3, 2014, Campinas. *Anais...* Curitiba: Embrapa Florestas, 2014. p. 81-98.

Wang, W.-M.; Li, Z.-L.; Su, H.-B. Comparison of leaf angle distribution functions: Effects on extinction coefficient and fraction of sunlit foliage. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 143, p. 106 – 122, 2007.