

Balço de água em Eucaliptos com a caracterização do dossel por técnicas de Sensoriamento Remoto

João Viane Soares¹, Alexandre Cândido Xavier², Auro Campi de Almeida³

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515 - 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil
e-mail: viane@ltd.inpe.br

²Departamento de Engenharia Rural, ESALQ

³Aracruz Celulose S.A.
Rodovia Aracruz-Barra do Riacho - km25 - Aracruz-ES - 29197-000 - Brasil
e-mail: aca@aracruz.com.br

ABSTRACT

This paper deals with the development of a water budget model for Eucalyptus forest, using a conceptually simple one-dimensional mass balance approach within the root zone of the forest. The model uses Leaf Area Index to quantify the forest structure important for mass and energy exchange, and this represents a key simplification for regional scale applications. Remote Sensing Vegetation Indexes and mixture modeling techniques were used to estimate IAF. A five-layered water balance model, with water movement between layers along hydraulic gradients, was developed and parameterized for a eucalypt plantation (*Eucalyptus grandis* Hill ex. Maiden hybrids) in Brazil. Available soil water controls stomatal conductance and hence transpiration, which is calculated by the Penman-Monteith equation. The remote sensing derived IAF was used to compute the canopy conductance that drives the Penman-Monteith formulation. The test period was from October 1995 to September 1996 in a nine-year-old plantation in an experimental catchment in eastern Brazil. Total transpiration for the year was 1116 mm, with 119 mm intercepted and re-evaporated and another 79 mm soil surface evaporation, giving evapotranspiration of 1314 mm compared to rainfall of 1396 mm. The water balance was closed by net flow below the root zone of about 53 mm and an increase in water storage (in the first layer) of 29 mm. The model also estimated a water deficit of 135 mm (difference between the potential and current transpiration) for the period. Upward flux from the water table was around 81 mm and piezometric measurements showed 1.5 m recession for the same period. The upward flux into the root zone was about 1 mm day⁻¹ at the end of a long dry season; that kept the water storage in that zone to about 15% of capacity and helped prevent complete stomatal closure.

Comparison between estimated water storage and measurements confirmed that this model is a very promising tool for calculating water use by plantations. It can also provide water balance information and information about stomatal conductance for growth prediction models.

Keywords: Remote Sensing, Vegetation Indexes, IAF, Eucalypt, Water balance

Introdução

O Índice de Área Foliar (IAF) é considerado o melhor descritor da estrutura de dosséis vegetais, na escala regional, para definir trocas de calor e de massa na interface com a atmosfera^{9,10,11}. Um esforço considerável tem sido desenvolvido na estimativa de parâmetros biofísicos a partir de índices de vegetação tais como os clássicos “Normalized Difference Vegetation Index¹¹”, NDVI e o “Soil Adjusted Vegetation Index⁴”, SAVI. Recentemente, tem-se tentado utilizar variáveis derivadas de modelos espectrais de mistura como fração de vegetação, fração de sombra e fração de solo^{12,13}. Estas componentes são as frações destes elementos em cada pixel (elementos puros).

O primeiro objetivo deste estudo foi o de verificar a adequação de diversos índices de vegetação (clássicos e fração de elementos puros) para estimar o IAF de plantações (híbridos de *E. grandis*).

O segundo objetivo é computar o balanço de água de plantações de Eucalipto usando a parametrização Penman-Monteith para estimar transpiração, que é a principal saída de água do ecossistema, através de um modelo baseado em processos, para computar as entradas e saídas de água do sistema radicular.

Para testar o modelo desenvolvido tanto utilizamos uma microbacia experimental de 287 ha. O modelo utiliza IAF para computar a condutância global do dossel, que é uma variável crítica na estimativa da transpiração.

Fundamentos teóricos

Índices de Vegetação

O Índice de Vegetação Diferença Normalizada, NDVI, é dado por:

$$\text{NDVI} = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (1)$$

onde ρ_4 é a reflectância no canal IR próximo (TM4) e ρ_3 é a reflectância no canal vermelho do visível (TM3)^{4,5,8}. O Índice de Vegetação ajustado para efeito do solo⁴, SAVI, é dado por:

$$\text{SAVI} = \left[\frac{(\rho_{I4} - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3 + L)} \right] \cdot (1 + L) \quad (2)$$

onde L é um fator de correção para efeito do solo, variando de 0.25 a 0.75.

Componentes espectrais de mistura (frações)

A radiância de um dado pixel pode ser assumida como uma combinação linear dos componentes que o compõem. Tipicamente, os componentes puros de pixels de florestas são vegetação verde, sombra e solo¹². Para uma dada banda espectral temos:

$$r_i = \sum_{j=1}^n (a_{ij} \cdot x_j) + e_i \quad (3)$$

em que:

r_i = reflectância do “pixel”, na i -ésima banda espectral;

a_{ij} = reflectância do j -ésimo componente na i -ésima banda espectral;

x_j = fração do j -ésimo componente do pixel,

e_i = resíduo na i -ésima banda espectral

Vários métodos podem ser usados para estimar as frações de cada componente puro, sendo o método de estimação pelos mínimos quadrados o mais usado ^{12,13}.

Os Índices de vegetação foram correlacionados a medidas diretas de LAI usando um método baseado em atenuação luminosa (Licor LAI 2000), realizadas em talhões de plantação de Eucalipto com idades ente 12 e 84 meses. O uso destas técnicas para estimar IAF de Eucaliptos está exaustivamente discutido em ^{6,17}.

Balanço de água na zona radicular.

A água estocada no perfil do solo (até a profundidade de exploração pelo sistema radicular) ao final do dia (i) é dada pelo estoque do dia anterior ($i-1$), somada da entrada (precipitação, P – interceptação, I_{cp}), e diminuída da saída (transpiração, E_t + evaporação do solo, E_s + escoamento líquido para fora do sistema, Q_{liq}):

$$\Delta\theta = \theta_{\text{solo}}(i) - \theta_{\text{solo}}(i-1) = (P - I_{cp}) - (E_t + E_s + Q_{liq}) \quad (4)$$

em que $\theta_{\text{solo}} = \sum \theta_v \Delta z$, isto é a soma em mm de água para as várias camadas do solo em que se mede umidade do solo, até a profundidade do sistema radicular considerado.

A transpiração diária ($\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) é estimada pela formulação de Penman-Monteith ^{9,10}:

$$E_t = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{\Delta R_n + \rho_a c_p g_a D}{(\Delta + \gamma)(1 + g_a / g_c)} \right] \cdot t \quad (5)$$

em que Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$), na temperatura T , R_n é a radiação líquida média durante o dia (W m^{-2}), ρ_a é a densidade do ar (kg m^{-3}), γ é a constante psicrométrica ($\text{mbar } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_p é o calor específico do ar ($\text{J kg}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$), D é o déficit de pressão de vapor entre o ar e o dossel (mbar), g_a condutância aerodinâmica do dossel (ms^{-1}), g_c é a condutância global do dossel ao vapor d'água (ms^{-1}), L é o calor latente de vaporização da água (J Kg^{-1}), e t é a duração do dia (s day^{-1}). A condutância global do dossel, g_c é dada por $g_c = g_s \cdot \text{IAF}$, em que g_s é a condutância estomática (converted into ms^{-1} units) e IAF é o Índice de Área Foliar ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$).

A partir de dados de campanhas ecofisiológicas de campo, foi desenvolvidas três relações funcionais: 1) entre o potencial de água na folha ao amanhecer, Ψ_1 , e a disponibilidade

relativa de água no solo (equação 6); 2) correção de g_s em função de Ψ_1 (equação 7), e 3) uma equação de correção (redução) para o déficit de vapor d'água, D (equação 8).

$$\Psi_1 = 0.33 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{\max}} \right)^{-0.57} \quad (6)$$

$$g_s = g_{s \max} - m_w (\Psi_1 - \Psi_{1 \min}) \quad (7)$$

em que $\Psi_{1 \min}$ é o potencial de água na folha que induz o fechamento estomático completo (em torno de -2.0 MPa), sendo m_w a declividade da função.

$$g_{cD} = g_c + \left[\frac{f_{gc} \cdot g_c - g_c}{3} \right] \cdot D \quad (8)$$

em que f_{gc} é a fração de g_s quando $D=3$ KPa. O termo entre colchetes é a declividade da relação linear de g_c vs. D . Então, g_{cD} é a condutância média diária corrigida para os efeitos de água disponível no solo e o déficit de pressão de vapor.

A evaporação do solo, E_s , é estimada usando Penman-Monteith com a condutância do solo diminuindo rapidamente na medida que a disponibilidade de água no solo cai^{2,15,16}.

Um sub modelo de fluxo de água no solo foi também acoplado ao modelo de balanço. Neste compartimento, o solo é dividido em várias camadas, entre as quais a água se move seguindo o gradiente hidráulico (Lei de Darcy). A textura do solo é utilizada para inicializar a condutividade hidráulica no perfil do solo, de acordo com^{1,3}. Quando o sistema radicular retira a água da primeira camada de solo, pode ocorrer uma inversão do gradiente com um fluxo ascendente a partir de camadas mais profundas. Detalhes estão em¹⁷.

Campanhas de campo

Um total de 130 talhões foram amostrados para IAF, ao longo de 3 meses. Para cada talhão, foram tomadas 25 medidas de IAF em posições distintas, usando um par de instrumentos LICOR LAI-2000 (abaixo/fora do dossel). Os talhões selecionados para amostragem tinham tamanho mínimo de 9 ha, correspondendo a um mínimo de 100 pixels de uma imagem TM na resolução 30 x 30 m. Uma imagem LANDSAT TM foi adquirida durante a campanha de campo. Uma descrição detalhada da campanha pode ser encontrada em¹⁷.

O teste do modelo hidrológico foi realizado para o ano hidrológico Outubro/1995 - Setembro/1996, último ano antes do corte do Eucalipto da Microbacia Experimental da Aracruz. As medidas hidrometeorológicas realizadas na Microbacia Experimental incluem:

- ✓ Dezesseis tubos de acesso para sonda de nêutrons medindo umidade do solo até 2,80 m, em intervalos regulares de 20 cm.
- ✓ Um piezômetro medindo nível do lençol freático desde 1994

- ✓ Três estações meteorológicas automáticas, medindo Precipitação (mm), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ar (%), radiação solar global (Wm^{-2}), Radiação líquida (Wm^{-2}), PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e velocidade do vento (ms^{-1}).
- ✓ Experimento de interceptação para Eucaliptos estabelecido em 1994.
- ✓ Um vertedouro para medir escoamento para fora da bacia, estabelecido em 1996.

Os dados coletados durante as campanhas ecofisiológicas intensivas foram IAF (amostragem destrutiva e instrumentos LICOR 2000), Potencial Hídrico Foliar ao amanhecer (Ψ_1), condutância estomática, g_s , e profundidade e distribuição das raízes.

Resultados e discussão.

IAF a partir de técnicas de Sensoriamento Remoto

Entre os Índices de Vegetação investigados para estimar IAF regional (derivados a partir de Sensoriamento Remoto Óptico), os dois melhores foram Fração de vegetação verde, F_{GV} , e o Índice ajustado para solo, $SAVI$, com R^2 em torno de 0.7, figura 1. Como o $SAVI$ é mais fácil de se obter, este índice foi utilizado para inverter uma sub região da imagem TM para produzir uma “imagem de IAF”, mostrada na Figura 2. Os talhões são evidenciados de forma clara com seus limite geométricos bem definidos, indicando homogeneidade de IAF dentro de seus limite. O IAF médio da microbacia experimental, usado no modelo de balanço, foi de $2,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$.

Balanço de água na zona radicular

Os componentes do balanço de água da plantação de Eucalipto de 9 anos de idade estão na Tabela 1. A interceptação (re-evaporação) foi de 9% da precipitação, e este valor corresponde ao que foi medido no mesmo período, e a evaporação à superfície do solo foi de 7 % da transpiração. A evapotranspiração total foi de 1314 mm para o período e a razão evapotranspiração/precipitação foi de 0.94. O balanço de água é fechado por um fluxo líquido abaixo da zona radicular da ordem de 53 mm e um incremento em estoques de 29 mm. O fluxo líquido tem duas componentes: drenagem de 152 mm e um fluxo ascendente do solo abaixo do sistema radicular da ordem de 100 mm quando o gradiente hidráulico se inverte em razão da extração de água na zona radicular.

O modelo também gerou uma estimativa de déficit hídrico (ou déficit de transpiração, diferença entre a transpiração potencial e a transpiração real) de 135 mm para o período. Este déficit concentrou-se nos meses secos e reflete o controle estomático sobre a transpiração, induzido pela menor disponibilidade de água disponível.

O teste principal do modelo de balanço de água é a comparação entre os valores umidade do solo (estoque, mm) medidos e estimados pelo modelo (Figura 3). Em geral a concordância ente os valores é muito boa (umidade de solo é medida semanalmente ou quinzenalmente). Observamos taxas praticamente idênticas de redução da umidade do solo ao longo do mês de Janeiro, por conta de um veranico ocorrido depois de 770 mm de precipitação nos meses precedentes que levaram ao solo à sua capacidade de estoque.

Conclui-se que a estimativa da taxa de transpiração parece precisa. De Abril até meados de Setembro (período seco, outono/inverno), os valores calculados pelo modelo são muito próximos aos medidos; durante o mês de agosto o acordo foi praticamente perfeito, indicando que de fato ocorre um fluxo de água ascendente para a camada de solo que compreende o sistema radicular que permite manter a transpiração num certo nível (20% do potencial) e o estoque de água em aproximadamente 15% da capacidade máxima.

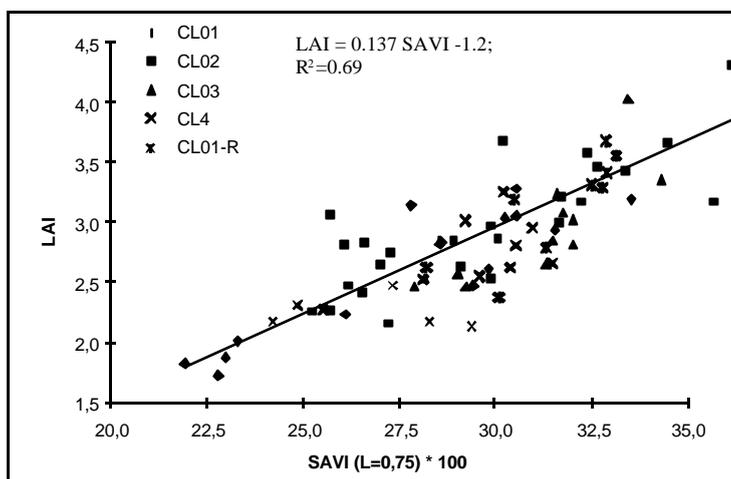


Figura 1 – Curva de regressão de IAF versus SAVI (L=0,75), usando dados de vários clones em conjunto (CL01, CL02, CL03, CL04 and CL01-R).

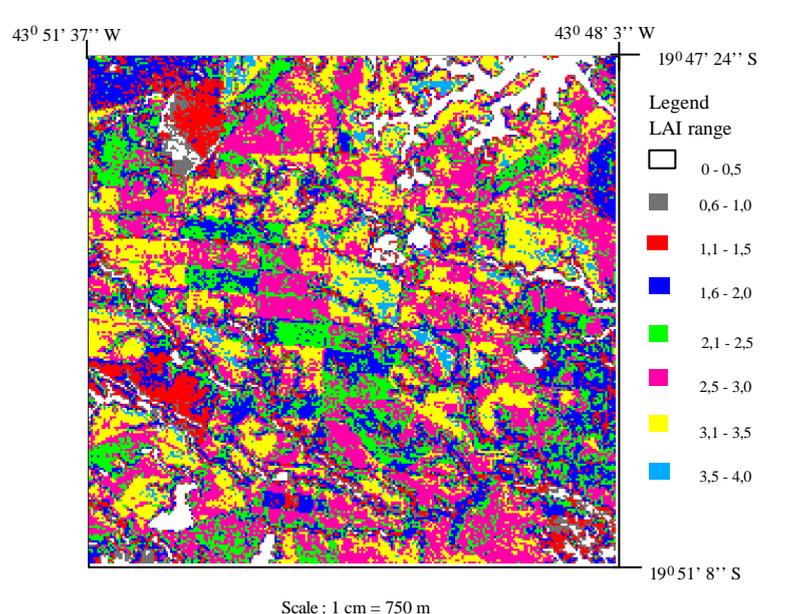


Figura 2. IAF obtido pel inversão da imagem Landsat 7 com base na relação linear SAVI vs IAF.

A Figura 4 mostra a variação diária da transpiração (mm dia^{-1}) para o ano hidrológico Outubro/95-Setembro/96. A transpiração variou de 5.8 mm dia^{-1} para os dias quentes de verão sem restrição de água no solo e com elevados níveis de energia solar a 1.1 mm dia^{-1}

para os dias de inverno com baixa umidade do solo, energia disponível reduzida (menos que metade dos valores de pico do verão) e Déficit de Pressão de Vapor elevado (dias secos). Os valores elevados de Janeiro e Fevereiro (período de veranico de 40 dias, média de 5.5 mm dia⁻¹) corresponderam a uma queda no estoque de água disponível no solo de 160 mm para 40 mm (medidos e estimados), e a inversão do gradiente de potencial supriu 50 mm de fluxo ascendente. Estes resultados estão de acordo com estimativas independentes realizadas para dias particulares do mesmo período⁷.

Tabela 1. Balanço de Água da plantação de Eucalipto de 9 anos de idade – de Outubro de 1995 a Setembro de 1996.

	Componente do balanço	Valor (mm)
Entrada	Precipitação	1396
Saída	Interceptação e re- evaporação	119
	Evaporação do Solo	79
	Fluxo líquido abaixo da zona radicular	53
	Transpiração	1116
Variação de estoque		29

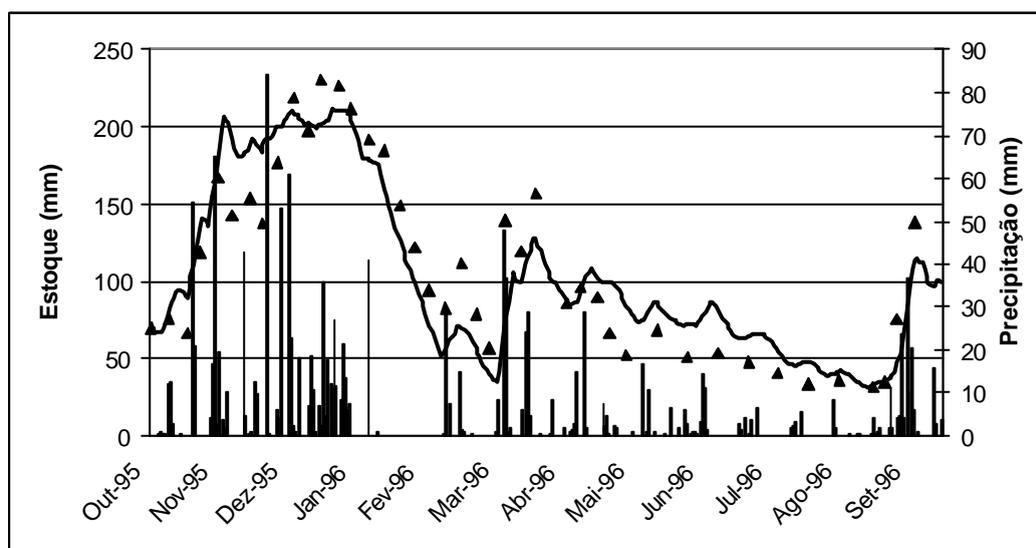


Figura 3. Estoque de água estimado (linha sólida) x Estoque medido na zona radicular (triângulos), eixo esquerdo, para o ano hidrológico Outubro/95-Setembro/96. No eixo da direita está Precipitação (barras verticais, eixo direito).

Conclusões

Mostrou-se que técnicas de Sensoriamento Remoto orbital podem ser usadas para estimar Iaf na escala regional com razoável precisão. Entre todos os produtos estudados, os índices SAVI (Índice de Vegetação ajustado para o efeito de solo) e F_{gv} (Fração de vegetação

verde) foram os melhores estimadores de IAF. Assim, estas estimativas espacializadas de IAF podem ser utilizadas nos modelos hidrológicos e de Produtividade Primária Líquida.

Para o balanço de água, a conclusão principal é que o modelo desenvolvido para estimar o uso de água para plantações de Eucalipto é bastante promissor e parece corretamente inicializado e ajustado para as condições da Aracruz Celulose S.A. O grau de concordância entre os estoques de água no solo estimados pelo modelo e medidos por atenuação de nêutrons pode ser considerado elevado.

Resultou claro que plantações de Eucalipto (*E. Grandis*) exercem bom controle estomático sobre a perda de água por transpiração. Ao final da estação seca, as taxas de transpiração eram 5 vezes menores que aquelas que ocorrem no verão úmido em dias claros.

Foi também evidenciado que a camada de solo abaixo da zona radicular funciona como um reservatório secundário de água para as raízes. Um fluxo ascendente é estabelecido a partir desta camada, provocado pela extração de água na zona radicular que causa uma inversão no gradiente de potencial de água no solo.

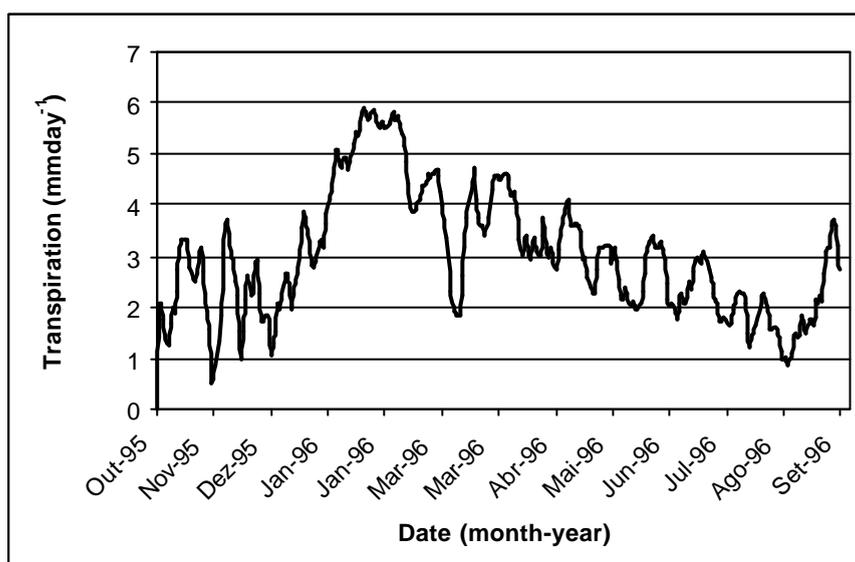


Figura 4. Transpiração (mm dia^{-1}) o ano hidrológico Outubro/95-Setembro/96.

Referências

1. Campbell, G.S., 1974. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data, *Soil Sci.*, 117, 311-314.
2. Choudhury, B.J., Monteith, J.L., 1988. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces. *Q.J.R. Meteorological Society*, 114:373-398.
3. Clapp, R. B., and Hornberger, G. M. 1978. Empirical Equations for Some Soil Hydraulic Properties. *Water Resources Research* 14:601-604.
4. Huete, A.R. A soil-adjusted Índice de Vegetação (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25:295-309, 1988.

5. Jackson, R.D.; Huete, A. Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine*, 11:185-200, 1991.
6. Lang, A.R.G; McMurtrie, R.E. Total leaf areas of single trees of *Eucalyptus grandis* estimated from transmittances of the sun's beam. *Agricultural and Forest Meteorology*, 58:79-92, 1992.
7. Mielke, M. S., Oliva, M. A., Barros, N. F., Penchel, R. M., Martinez, C. A., and Almeida, A. C. . 1999. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. *Trees* 13:152-160.
8. Monteith, J.L., and Unsworth, M.H., 1990. *Principles of Environmental Physics*, 2nd Ed. Arnold, London.
9. Rosenberg, N.J., Blad, B.L., Verma, S.B., 1983. *Microclimate: the biological environment*, 2nd edition, John Wiley & Sons, 495 pp.
10. Running, S.W.; Coughlan, J.C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. hidrological balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42:125-154, 1988.
11. Running, S.W.; Nemani, R. R.; Peterson, D.L.; Band, L.E.; Potts, D.F.; Pierce, L.L.; Spanner, M. A. Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation. *Ecology*, 70(4):1090-1101, 1989.
12. Shimabukuro, Y.E. *Shade Images Derived from Linear Mixing Models of Multispectral Measurements of Forested Areas*. (Ph.D. Dissertation) - Colorado State University, Fort Collins, CO, 1987.
13. Shimabukuro, Y.E.; Smith, J.A. The least-square mixing models to generate fraction imagens derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(1): 16-20, 1991.
14. Soares, J.V., Almeida, A. C., Penchel, R.M., Hydrological balance of Eucalypt plantations through transpiration by the method of Penman-Monteith. IUFRO conference on silviculture an improvement of Eucalypts, Salvador, Brazil, 1997, pp 080-088.
15. Soares, J.V., Bernard, R., Taconet, O., Vidal-Madjar, D., Weill, A., 1987. Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *Journal of Hydrology*, 99:281-296.
16. Soares, J.V., Almeida, A.C., 2000. Water balance is a fast growing eucalypt plantation including soil water flux, sumetido ao "Jornal of hydrology".
17. Xavier, A.C. Estimativa de propriedades biofísicas de plantações de Eucaliptos a partir de dados Landsat-TM. Master of Science Dissertation. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.