

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E UMIDADE DO SOLO EM UMA PLANTAÇÃO DE SOJA

André Luís Diniz dos Santos¹; Maurício Felga Gobbi²

RESUMO – Esse artigo descreve um método para calcular a evapotranspiração e a umidade no solo em uma plantação de soja, utilizando uma versão modificada do modelo de transferência entre superfície-vegetação-atmosfera SVAT ISBA (Noilhan e Planton, 1989). O cálculo da evapotranspiração original do modelo utiliza parâmetros puramente físicos. Foi acoplado então o módulo A-gs proposto por Jacobs (1994) para descrever os processos fisiológicos na escala das folhas. O modelo foi implementado utilizando-se uma série de dados medidos em campo no estado do Paraná.

ABSTRACT – This paper describes a method for calculating evapotranspiration and soil moisture in a soybean plantation using a modified version of the SVAT ISBA (Noilhan and Planton, 1989) model of surface-vegetation-atmosphere transfer. The calculation of the original evapotranspiration of the model uses purely physical parameters. The module A-gs proposed by Jacobs (1994) was then coupled to describe the physiological processes in the scale of the leaves. The model was implemented using a series of field data in the state of Paraná.

Palavras-Chave – Evapotranspiração, modelo numérico, plantação de soja.

1. INTRODUÇÃO

Nesse trabalho foi estudada a modelagem da umidade em três camadas do solo e na vegetação, e também a evapotranspiração em uma plantação de soja. O modelo utilizado foi desenvolvido em torno de um modelo de transferência existente conhecido como ISBA (*Interactions between Soil Biosphere Atmosphere*) (Noilhan e Planton, 1989) com algumas modificações e a inclusão de módulos específicos para o cálculo dos fluxos estomáticos.

As modificações nos processos físicos do modelo ISBA original implementadas no presente trabalho foram propostas por Manzi e Planton (1994), Mahfouf e Noilhan (1996), Habets et al. (1999), Mascart et al. (1995), Boone et al. (1999), Prevedello (2003) e Vissotto (2003). Nos aspectos biológicos a principal modificação foi a substituição da abordagem de Jarvis (1976) para o cálculo da abertura dos estômatos das folhas pela abordagem mais fisiológica de Jacobs (1994)

1 Mestre em Engenharia Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFPR, 41-98863-2223, diniz_amb@yahoo.com.br.

2 PhD Engenharia Civil e Ambiental, Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR, 41-3320-2021, mfgobbi@gmail.com.

(denominada A-gs). No presente texto foram comparados os resultados da simulação utilizando a abordagem proposta com valores medidos em campo.

Esquemas de transferência entre solo-vegetação e atmosfera (SVAT's) incluem em parametrizações em diferentes graus de complexidade do particionamento de energia e da condutância estomática das plantas. Destacamos o modelo SVAT ISBA (Noilhan e Planton, 1989; Noilhan e Mahfouf, 1996), empregado nesse artigo. No modelo SVAT ISBA original, como em muitos outros, a descrição biológica do controle da transpiração é feita através de uma simples parametrização empírica para a condutância estomática, adaptando a abordagem proposta em Jarvis (1976). Essa abordagem vem sendo utilizada em diversos modelos SVAT's como os propostos por Noilhan e Planton (1989); Pleim e Xiu (1995); Viterbo e Beljaars (1995); Bosilovich e Sun (1995); Alapaty et al. (1997). Nesses modelos a resposta estomática é calculada em função de parâmetros meteorológicos, tais como temperatura do ar, pressão de vapor ambiente, radiação e disponibilidade de umidade no solo. Além destes esquemas com abordagem mais física, existem também modelos com abordagens mais fisiológicas.

Uma das principais diferenças entre as abordagens, meteorológica e fisiológica nos modelos SVAT's, é a maneira pela qual a condutância estomática é modelada. A resposta dos estômatos, quantificada como resistência (ou condutância) estomática, é uma medida da dificuldade (ou facilidade) para a transpiração da vegetação. A mudança na transpiração altera a evapotranspiração/fluxo de calor latente, a qual, em resposta ao balanço de energia na superfície, interfere também na estimativa do fluxo de calor sensível (Niyogi e Raman, 1997; Alapaty et al., 1997; Jarvis e McNaughton, 1986; De Bruin, 1983). Mais recentemente, a tendência tem sido a de se substituir as abordagens puramente meteorológicas por abordagens fisiológicas que permitem modelar a resposta das plantas às trocas gasosas tais como assimilação líquida de carbono e respiração noturna. Dentre os modelos que utilizam abordagens fisiológicas para descrever a condutância estomática, pode-se citar Jacobs (1994); Sellers et al. (1996); Foley et al. (1996); Cox et al. (1998); Calvet et al. (1998).

Recentes análises de modelos SVAT's sugerem que as abordagens meteorológicas e fisiológicas para o cálculo da condutância estomática, podem fornecer resultados diferentes com relação a alterações nos níveis de CO₂ atmosférico. Tendo em vista o cenário atual de aquecimento global devido ao aumento de gases de efeito estufa na atmosfera, é fundamental que os modelos SVAT's levem em conta o CO₂ atmosférico. Uma limitação da parametrização do tipo Jarvis (Jarvis, 1976) é a falta de realimentação com relação à concentração de CO₂ atmosférico. De fato, segundo Calvet et al. (1998) um aumento na concentração de CO₂ induz uma resposta fisiológica das plantas por meio de uma redução na condutância estomática para vapor de água. Esse efeito pode influenciar os balanços de energia e água em diversas escalas de tempo. Segundo Calvet et al.

(1998), em geral a parametrização do tipo Jarvis (Jarvis, 1976) fornece boas estimativas da transpiração, no entanto, a resposta estomática com relação a umidade do ar é simulada com dificuldade, e muitas vezes requer uma análise aprofundada dos fluxos e da condutância estomática em campo para calibrar o modelo. De fato, presume-se que os vários fatores ambientais agem de forma independente na condutância estomática, enquanto que experimentos de campo sugerem que podem ocorrer fortes interações entre eles (Collatz et al., 1991; Jacobs, 1994). Além disso, o valor prescrito do índice de área foliar IAF é muitas vezes uma estimativa grosseira, que não leva em conta as rápidas mudanças na cobertura vegetal associadas a eventos climáticos (secas em particular). Por isso as parametrizações fisiológicas parecem ser mais apropriadas do que as parametrizações do tipo Jarvis, sendo particularmente verdadeiro para simulações de mudanças climáticas (Betts et al., 1997).

2. CONCEITOS E FUNDAMENTOS

2.1. Sistema de equações do modelo ISBA

O sistema de equações que formam o ISBA foi originalmente proposto por Noilhan e Planton (1989), porém muitas modificações têm sido propostas desde sua versão original. O conjunto de equações utilizados nessa pesquisa são as seguintes,

$$\frac{dT_s}{dt} = C_T(R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau_d}(T_s - T_2) \quad , \quad (1)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{\tau_d}(T_s - T_2) \quad , \quad (2)$$

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{c_1}{\rho_w}(P_g - E_g) - \frac{c_2}{\tau_d}(w_g - w_{geq}) \quad , \quad (3)$$

$$\frac{dw_2}{dt} = \frac{1}{\rho_w d_2}(P_g - E_g - E_{tr}) - D_2 - K_2 \quad , \quad (4)$$

$$\frac{dw_3}{dt} = \frac{d_2}{d_3 - d_2}(K_2 - D_2) - K_3 \quad , \quad (5)$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{\rho_w d_r}(P_r - E_r - R_r) \quad , \quad (6)$$

onde as variáveis são: a temperatura do solo na interface superfície-atmosfera (T_s), a capacidade térmica da superfície (C_T), a radiação líquida (R_n), o fluxo de calor sensível (H), o fluxo de calor latente (LE), o período do ciclo diurno do solo (τ_d), a temperatura média da zona de raízes (T_2), a umidade volumétrica na camada superficial do solo de profundidade d_1 (w_g), a massa específica da água (ρ_w), o coeficiente função das propriedades hidráulicas do solo próximas a superfície (C_1), o coeficiente que caracteriza a velocidade com que o perfil de umidade é repostado ao equilíbrio (C_2), a precipitação que atinge o solo (P_g), a evaporação do solo (E_g), a umidade de equilíbrio das forças gravitacionais e capilares (w_{geq}), a umidade média da zona de raízes (w_2) de profundidade d_2 , a transpiração da vegetação (E_{tr}), a umidade nas plantas (w_r), a altura da vegetação (d_r), a precipitação

interceptada pela vegetação (P_r), a evaporação direta sobre a superfície da vegetação ($E_r = E_v - E_{tr}$), a evapotranspiração da vegetação (E_v), o escoamento superficial da vegetação para o solo (R_r), a profundidade da terceira camada do solo onde a umidade não sofre alteração devido à oscilação diurna (d_3), a difusão vertical de umidade do solo entre as camadas (D_2), a drenagem gravitacional de umidade do solo para a camada w_3 (K_2) e a drenagem gravitacional de umidade do solo pela base da camada w_3 (K_3).

O fluxo de vapor de água E é a soma da evaporação do solo E_g com a evapotranspiração da vegetação E_v ,

$$E_g = (1 - veg)\rho_a C_H V_a [h_u q_{vsat}(T_s) - q_a] \quad , \quad (8)$$

$$E_v = veg\rho_a C_H V_a h_v [q_{vsat}(T_s) - q_a] \quad , \quad (9)$$

onde $q_{vsat}(T_s)$ é a umidade específica saturada na temperatura T_s e q_a a umidade específica na altura z_a . A umidade relativa h_u na superfície está relacionada com a umidade superficial do solo w_g e h_v é o denominado coeficiente de Halstead.

A evapotranspiração da vegetação pode ser um fluxo positivo ou negativo. Quando o fluxo é negativo (da atmosfera para a vegetação) é suposto a ocorrência de orvalho na sua taxa potencial e o coeficiente de Halstead é tomado como $h_v = 1$,

$$E_v = veg\rho_a C_{dq} V_a [q_{vsat}(T_s) - q_{va}] \quad , \quad (10)$$

porém quando o fluxo é positivo (da vegetação para a atmosfera) o coeficiente de Halstead h_v leva em conta a evaporação direta E_r da vegetação, além da transpiração que deixa de ser igual a zero,

$$h_v = \frac{(1-\delta)R_a}{R_a - R_s} + \delta \quad , \quad (11)$$

$$E_{tr} = veg \frac{1-\delta}{R_a + R_s} [q_{vsat}(T_s) - q_a] \quad , \quad (12)$$

$$E_r = veg \frac{\delta}{R_a} [q_{vsat}(T_s) - q_a] \quad , \quad (13)$$

$$E_v = E_{tr} + E_r \quad , \quad (14)$$

onde R_a , R_s e δ são, respectivamente, a resistência aerodinâmica, a resistência estomática e uma função de potência da chuva interceptada pela vegetação.

A resistência estomática R_s do ISBA original é calculada através da parametrização simplificada proposta por Jarvis (1976),

$$R_s = \frac{R_{smin}}{IAF} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1} \quad , \quad (15)$$

onde R_{smin} é a resistência mínima do estômato, IAF é o índice de área foliar e F_1, F_2, F_3, F_4 , são os coeficientes que parametrizam a resposta do estômato a fatores puramente físicos (principalmente meteorológicos), sendo estes respectivamente, a radiação, o estresse hídrico do solo, o déficit na pressão de vapor da atmosfera e a temperatura do ar. A chamada condutância estomática g_s é o inverso da resistência estomática.

Contabilizado o fluxo de vapor de água, calcula-se então o fluxo de calor latente LE ,

$$LE = L(E_g + E_v) \quad , \quad (16)$$

onde L é o calor latente de evaporação da água.

2.2. Modelagem Estomática Fisiológica

O objetivo do modelo fisiológico é simular a assimilação líquida de CO_2 A_n e a condutância estomática de vapor de água na folha g_s como função da densidade do ar, concentração de CO_2 na superfície da folha, temperatura da folha, déficit de saturação na superfície da folha, radiação global e tipo de vegetação. O déficit de saturação D_s representa a diferença entre a umidade específica de saturação à temperatura da folha e a umidade específica do ar próximo à superfície da folha. Juntamente com A_n e g_s , o modelo calcula a concentração interna de CO_2 da folha.

Um efeito importante considerado pela modelagem fisiológica é a sensibilidade à concentração de CO_2 na atmosfera. Calvet et al. (1998) apontam que, do ponto de vista do balanço hídrico um aumento na concentração de CO_2 do meio tem dois efeitos imediatos conflitantes: o índice de área foliar IAF pode aumentar devido a um acréscimo na fotossíntese, e ao mesmo tempo, a condutância de vapor d'água da folha pode diminuir. O primeiro efeito tende a aumentar a transpiração da cobertura vegetal como um todo, enquanto que o segundo tende a diminuir a transpiração das folhas individuais. A mudança resultante na evapotranspiração e na umidade do solo, pode ser totalmente diferente de um tipo de planta para outra para determinadas condições atmosféricas.

Além disso, há um terceiro efeito relacionado ao *feedback* entre a transpiração e a umidade na zona de raízes (w_2). As mudanças na transpiração afetam a disponibilidade de umidade no solo, sendo que este efeito ocorre durante longos períodos de tempo e pode provocar diferenças sazonais no balanço hídrico resultante. Este *feedback* foi contabilizado por Calvet et al. (1998), que verificaram que, apesar de uma resposta intensa do índice de área foliar IAF para o aumento da concentração de CO_2 no meio ambiente, a umidade no solo raramente sai de seu valor de referência porque as plantas limitam a condutância estomática de vapor de água através do fechamento dos estômatos, visando minimizar o efeito do aumento do índice de área foliar IAF sobre a transpiração. Um aspecto importante dos modelos fisiológicos é a diferenciação metabólica entre tipos de vegetação (Jacobs, 1994). As plantas podem ser divididas em três grandes grupos conforme o seu metabolismo fotossintético: plantas C_3 , plantas C_4 e plantas CAM (Crassulacean Acid Metabolism).

2.3. Módulo A-gs

Baseando-se no fato de que a difusão do vapor d'água para fora da folha e a absorção do CO₂ utilizado para a fotossíntese ocorrem pelo mesmo caminho, pode-se definir calcular a condutância estomática g_s a partir da assimilação fotossintética por,

$$g_s = \frac{1,6A_n}{(C_s - C_i)} \quad , \quad (17)$$

sendo A_n a taxa líquida de fotossíntese, C_i e C_s as concentrações de CO₂ dentro e fora da folha respectivamente. O fator 1,6 é devido à diferença entre a difusividade do CO₂ e do vapor d'água. Assim, uma vez calculado A_n , calcula-se g_s e E_{tr} pelas relações descritas acima.

A aproximação fotossintética pressupõe a distinção entre duas condições: radiação fotossintética ativa RFA sendo fator limitante (na saturação da concentração de CO₂) e CO₂ sendo fator limitante (na saturação de intensidade de luz). Com RFA sendo fator limitante na modelagem fotossintética, A_n é linearmente relacionada com a quantidade absorvida. Segundo Thornley et al. (1976) para altas intensidades de luz e concentrações limitantes de CO₂, supõem-se que a taxa de fotossíntese coincide com o valor assintótico da curva de resposta da luz A_m . Para valores pequenos de C_i , A_m é relacionado linearmente com a concentração C_i de CO₂ de acordo com Goudriaan et al. (1985), que então propôs uma função resposta empírica para combinar as respostas da assimilação fotossintética líquida A_n à concentração de CO₂ e luz,

$$A_n = (A_n + R_d) \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-\varepsilon I_a}{A_m + R_d} \right] \right\} - R_d \quad . \quad (18)$$

A equação (18) prediz uma taxa ilimitada de fotossíntese para altas intensidades de luz e altas concentrações de CO₂. Porém, a taxa de fotossíntese será limitada por um valor máximo $A_{m,max}$ (Stitt, 1991). A diferença entre as concentrações de CO₂ fora e dentro da folha ($C_s - C_i$) é então parametrizada como função da umidade do ar, e isso é realizado tomando-se a relação entre C_i e C_s como,

$$f \equiv \frac{C_i - \Gamma}{C_s - \Gamma} = f_0 \left(\frac{1 - D_s}{D_{max}} \right) \quad . \quad (19)$$

A equação (19) descreve o efeito da concentração relativa de CO₂ dentro e fora da folha e permite também reproduzir a resposta do estômato com relação à umidade, gerando a solução simultânea da A_n e da razão C_i/C_s , permitindo iterações ou soluções analíticas.

3. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O modelo foi aplicado a uma plantação de soja na Fazenda São Lourenço (referida doravante por SLOU) no oeste do estado do Paraná. No experimento em SLOU, foram medidas séries de dados tanto para forçar quanto para testar o modelo ISBA-A-gs. O experimento de campo está detalhado em Vissotto (2003). Nessa pesquisa utilizou-se uma série anual de dados meteorológicos de 15/02/2001 até 22/02/2002. A safra de 2001/2002 esteve sujeita a uma alta radiação incidente média devido a pouca precipitação. A série original foi convertida em uma série

menor denominada SLOU2001, que compreende o período de 22/12/2001 até 26/12/2001, que foi o período referente ao pleno desenvolvimento das mudas de soja. As umidades no solo e o fluxo de calor latente usados nas comparações com os modelos foram medidas no experimento descrito em Dias et al. (2002).

Na figura (1) são apresentados os valores modelados (mod) da umidade retida na vegetação, umidade na camada superficial de solo de 10 centímetros de profundidade e umidade na camada da zona de raízes de 1 metro de profundidade, respectivamente, em comparações com valores medidos (med) da umidade no solo nas profundidades de 2, 20 e 40 centímetros. São mostrados juntos na figura os forçantes meteorológicos: umidade relativa no ar, precipitação e radiação solar incidente. As umidades modeladas no solo podem ser comparadas qualitativamente com os valores medidos, visto que, os valores modelados são médios nas camadas e os medidos pontuais. É mostrado na figura um período de quatro dias após um evento de chuva, verificando-se que o modelo representa bem a passagem da frente úmida na vegetação e no solo em consonância com a tendência dos valores medidos.

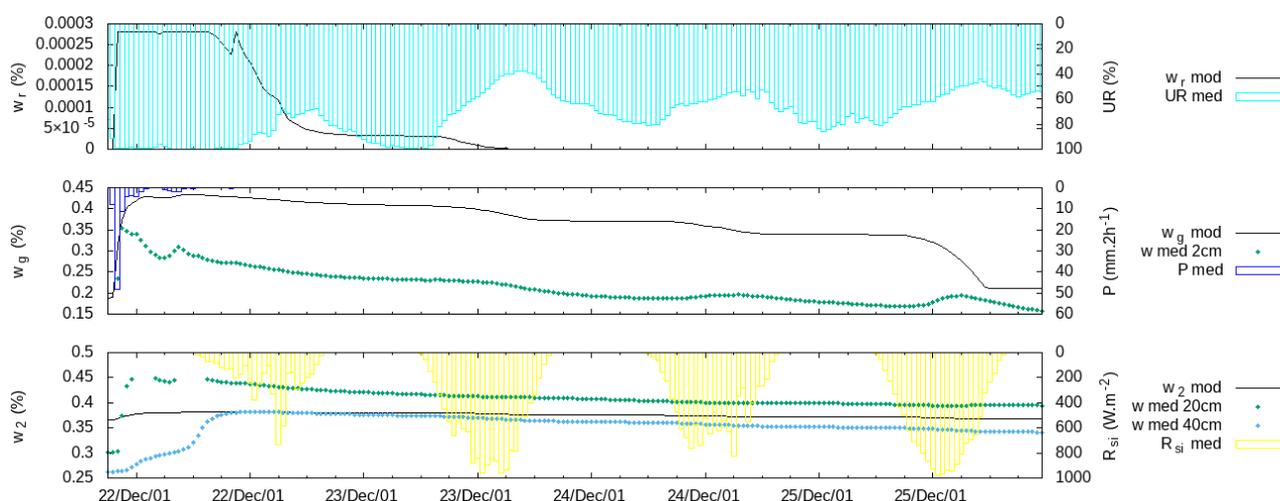


Figura 1 – Umidades na vegetação e no solo em comparação com valores de medições e forçantes meteorológicos.

Na figura (2) são apresentados para o mesmo período de tempo da figura (1) os valores do fluxo de calor latente modelado em comparação com valores de medição no quadro superior, enquanto que no quadro inferior é mostrado o particionamento modelado do fluxo de calor latente em proveniente da evaporação do solo, transpiração da vegetação e evaporação direta sobre a superfície da vegetação. De maneira semelhante à figura (1), são mostrados juntos na figura os forçantes meteorológicos: precipitação e radiação solar incidente. Pelo quadro superior verifica-se que o modelo simulou com qualidade a evapotranspiração, representada aqui pelo fluxo de calor latente. Após o evento de chuva, como consequência da nebulosidade a radiação diminui o que levou a valores menores de evapotranspiração. Nos dias seguintes, com maior radiação e solo úmido a evapotranspiração aumenta. No quadro inferior verifica-se baseado na modelagem que o

principal processo da evapotranspiração após evento de chuva com o solo úmido, nesse estudo, foi a evaporação do solo, mesmo a soja estando em seu máximo estágio de desenvolvimento. Também através da modelagem, verifica-se que a evaporação direta da água contida na superfície externa da vegetação é significativa apenas logo após o evento de chuva, o que leva a conclusão que a soja não possui grande eficiência nesse tipo de armazenamento, o que já era esperado, mesmo porque devido ao pequeno tamanho de seus exemplares e do caráter uniforme e homogêneo do seu cultivo, a radiação penetra em seu dossel com facilidade. Verifica-se também no quadro inferior que assim como na evaporação direta, na fotossíntese também, a radiação possui fundamental importância. Lembrando aqui que essas análises foram feitas após um evento de chuva, com o solo contendo razoável quantidade de água, suficiente para sustentar a evapotranspiração. Para solos em situações de estresse hídrico são necessárias novas análises em separado.

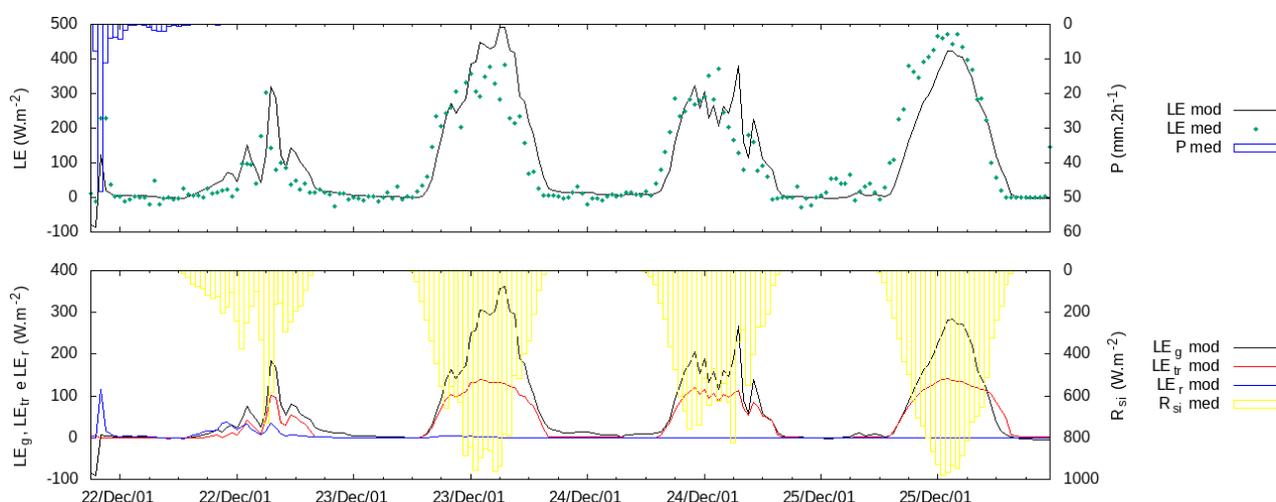


Figura 2 – Fluxos de calor latente em comparação com valores de medições e forçantes meteorológicas.

Na segunda linha da tabela (1) são apresentadas as análises quantitativas entre os valores da evapotranspiração medidos e modelados. Foram calculadas as estatísticas: viés (EM), erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de correlação (R) e eficiência de Nash-Sutcliff (ENS), dos fluxos de calor latente. Nas últimas duas linhas da tabela (1) são mostradas os valores máximos, mínimos e médios, medidos e estimados pela modelagem.

Tabela 1 – Comparações estatísticas entre os fluxos de calor latente, medidos e estimados.

	EM	EAM	REQM	R	ENS
LE (mod versus med)	-21,67619	54,29404	78,77601	0,87318	0,94785
	Máximo	Mínimo	Média		
LE med (W m⁻²)	471,40094	-27,20932	105,01175		
LE mod (W m⁻²)	491,50659	-4,22840	108,69719		

4. CONCLUSÕES

O modelo de transferência entre solo, vegetação e atmosfera ISBA-A-gs, fornece uma ferramenta para o cálculo da evapotranspiração e umidades em várias camadas do solo. Foi

implementado um método para esse cálculo onde a resposta da assimilação líquida de carbono A_n aos fatores ambientais foi modelada como primeiro passo a partir de parâmetros fisiológicos da planta (fotossíntese e respiração), e através do seu valor foi calculada a condutância estomática para vapor d'água g_s , que é então utilizada para diagnosticar a transpiração. Verificou-se em comparação com valores medidos em campo a eficiência do modelo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os recursos para a realização das medições foram proporcionados pelo CNPq (Projeto de Pesquisa 400171/95-3) e por ITAIPU BINACIONAL (contratos 5322/97 e AS/CT/0009/00).

REFERÊNCIAS

- Alapaty, K., Pleim, J. E., Raman, S., Niyogi, D. S., e Byun, D. W. (1997). *Simulation of atmospheric boundary layer processes using local-and nonlocal-closure schemes*. Journal of Applied Meteorology, 36(3):214–233.
- Betts, R. A., Cox, P. M., Lee, S. E., e Woodward, F. I. (1997). *Contrasting physiological and structural vegetation feedbacks in climate change simulations*. Nature, 387:796–799.
- Boone, A., Calvet, J.-C., e Noilhan, J. (1999). *Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force-Restore Method*. J Appl Meteorol, 38:1611–1630.
- Bosilovich, M. G. e Sun, W.-Y. (1995). *Formulation and verification of a land surface parameterization for atmospheric models*. Boundary-Layer Meteorology, 73(4):321–341.
- Calvet, J. C., Noilhan, J., Roujean, J. L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., e Wigneron, J. P. (1998). *An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting Sites*. Agric For Meteorol, 92:73–95.
- Collatz, G. J., Ball, J. T., Grivet, C., e Berry, J. A. (1991). *Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer*. Agricultural and Forest Meteorology, 54(2):107–136.
- Cox, P., Huntingford, C., e Harding, R. (1998). *A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme*. Journal of Hydrology, 212:79–94.
- De Bruin, H. (1983). *A model for the Priestley-Taylor parameter α* . Journal of climate and applied meteorology, 22(4):572–578.
- Dias, N. L., Kan, A., Grodzki, L., Sanchez, S. D., e Vissotto, D. (2002). *O método de covariâncias turbulentas atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor*. Revista Brasileira de Recursos hídricos, 7(1):143–160.
- Foley, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., Levis, S., Pollard, D., Sitch, S., e Haxeltine, A. (1996). *An Integrated Biosphere Model of Land Surface Processes, Terrestrial Carbon Balance and Vegetation Dynamics*. Global Biogeochemical Cycles, 10:603–628.
- Goudriaan, J., Van Laar, H., Van Keulen, H., e Louwerse, W. (1985). *Photosynthesis, CO₂ and plant production*. Em Wheat growth and modelling, páginas 107–122. Springer.

- Habets, F., Noilhan, J., Golaz, C., Goutorbe, J. P., Lacarrere, P., Leblois, E., Ledoux, E., Martin, E., Ottlo, C., e Vidal-Madjar, D. (1999). *The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database*. J of Hydrology, 217:75–96.
- Jacobs, C. (1994). *Direct impact of atmospheric CO₂ enrichment on regional transpiration*. Tese de Doutorado, Department of Meteorology, Wageningen Agricultural University, The Netherlands.
- Jarvis, P. G. (1976). *The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductances found in canopies in the field*. Phil. Trans. Roy Soc, London, Ser. B, 273:593–610.
- Jarvis, P. G. e McNaughton, K. (1986). *Stomatal control of transpiration: scaling up from leaf to region*. Advances in ecological research, 15(1):49.
- Mahfouf, J. F. e Noilhan, J. (1996). *Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the restore method*. J. Appl. Meteorol., 35:987–992.
- Manzi, A. O. e Planton, S. (1994). *Implementation of the isba parameterization scheme for land surface process in a GMC - an annual cycle experiment*. J of Hydrology, 155:353–387.
- Mascart, P., Noilhan, J., e Giordani, H. (1995). *A modified parameterization of flux-profile relationships in the surface layer using different roughness length values for heat and momentum*. Bound.-Lay. Meteorol., 72:331–344.
- Niyogi, D. S. e Raman, S. (1997). *Comparison of four different stomatal resistance schemes using FIFE observations*. Journal of Applied Meteorology, 36(7):903–917.
- Noilhan, J. e Mahfouf, J.-F. (1996). *The Isba Land Surface Parameterisation Scheme*. Global and Planetary Change, 13:145–159.
- Noilhan, J. e Planton, S. (1989). *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*. Monthly Weather Review, 117:536–549.
- Pleim, J. E. e Xiu, A. (1995). *Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models*. Journal of Applied Meteorology, 34(1):16–32.
- Prevedello, C. L. (2003). *Experimentos de solo para Santa Terezinha do Itaipu e calibração dos tdr's*. Comunicação interna.
- Sellers, P. J., Randall, D. A., Collatz, C. J., Berry, J. A., Field, C. B., Dazlich, D. A., Zhang, C., e Collelo, G. D. (1996). *A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs, Part I: Model Formulation*. Journal of Climate, 9:676–705.
- Stitt, M. (1991). *Rising CO₂ levels and their potential significance for carbon flow in photosynthetic cells*. Plant, Cell & Environment, 14(8):741–762.
- Thornley, J. H. et al. (1976). *Mathematical models in plant physiology*. Academic Press (Inc.) London, Ltd.
- Vissotto, D. (2003). *Modelagem numérica para interações superfície-atmosfera no estado do Paraná*. Tese de mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- Viterbo, P. e Beljaars, A. C. (1995). *An improved land surface parameterization scheme in the ECMWF model and its validation*. Journal of Climate, 8(11):2716–2748.