



## MODELAGEM MECANÍSTICA DA TRANSPIRAÇÃO DE PLANTAS SUBMETIDAS A DIFERENTES TRATAMENTOS HÍDRICOS

ANGELICA DURIGON<sup>1</sup>, QUIRIJN DE JONG VAN LIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Meteorologista, Pesquisadora de Pós-Doutorado, Laboratório de Física do Solo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba – SP, Fone: (0 xx 19) 3429 4715, [angelica.durigon@usp.br](mailto:angelica.durigon@usp.br).

<sup>2</sup>Engenheiro Agrônomo, Professor Titular, Laboratório de Física do Solo, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba – SP.

Apresentado no XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 06 de Setembro de 2013 – Centro de Convenções e Eventos Benedito Silva Nunes, Universidade Federal do Pará, Belém, PA

**RESUMO:** O objetivo desta pesquisa foi de testar a estimativa da taxa de transpiração de plantas de feijão por um modelo mecanístico em função das variáveis  $A-g_s$  ( $A$  de taxa de assimilação líquida de  $CO_2$ , e  $g_s$  de condutância estomática para o vapor d'água), cultivadas em um experimento de campo em 2010, e submetidas a dois tratamentos hídricos significativamente distintos (ótimo e com estresse), bem como indicar os erros associados às estimativas. Embora o erro estatístico encontrado no processo de validação tenha sido significativo, as simulações da taxa de transpiração de plantas apresentaram as características observadas em medições. Apesar do tratamento mecanístico do modelo para as estimativas, o tratamento semi-empírico de variáveis importantes do modelo pode ser indicado como o fator que reduz a qualidade das simulações.

**PALAVRAS-CHAVE:** modelagem numérica, estresse hídrico, feijão

### MECHANISTIC MODELLING OF PLANT TRANSPIRATION SUBJECT TO DIFFERENT WATER TREATMENTS

**ABSTRACT:** The main objective of this research was to test the transpiration rate of bean plants estimated by a mechanistic model as a function of  $A-g_s$  variables ( $A$  of net  $CO_2$  assimilation rate and  $g_s$  of stomatal conductance for water vapor), cultivated in a field experiment in 2010, and subjected to two significantly different water treatments (optimal and under stress), and to indicate the associated errors in simulations. Although the statistical error determined in the validation process is significant, the simulations of plant transpiration rate followed observed field characteristics. Despite the mechanistic model treatment to simulations, the semi-empirical treatment of important model variables can be indicated as the factor that reduces the quality of simulations.

**KEYWORDS:** numerical modelling, water stress, bean crop

## INTRODUÇÃO

Os modelos meteorológicos de previsão de tempo e clima, bem como os modelos de previsão de safras e hidrológicos, possuem rotinas numéricas destinadas exclusivamente ao tratamento



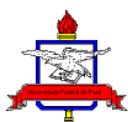


da interação da vegetação com o ambiente. A parametrização mecanística da taxa de transpiração de plantas encontrada nessas rotinas pode ser feita relacionando-a à condutância estomática, como ocorre em modelos do tipo  $A_{g_s}$  ( $A$  de taxa de assimilação líquida de  $CO_2$ , e  $g_s$  de condutância estomática para o vapor d'água). Um modelo desse tipo foi desenvolvido por Jacobs (1994), e tem como base mecanística as equações de Goudriaan et al. (1985) e descreve a taxa de transpiração em resposta a fatores ambientais, como a umidade e temperatura do ar e a radiação. Como uma das variáveis pode influenciar a sensibilidade do estômato aos demais fatores, o modelo também descreve as interações sinérgicas entre diferentes estímulos. O modelo  $A_{g_s}$  de Jacobs (1994), no entanto, utiliza parametrizações semi-empíricas para variáveis-chave, como o ponto de compensação de  $CO_2$  e a condutância do mesófilo, além de desconsiderar em seu equacionamento o efeito do estresse hídrico nas plantas. O objetivo desta pesquisa é testar sistematicamente a estimativa mecanística pelo modelo  $A_{g_s}$  de Jacobs (1994) da taxa de transpiração de plantas de feijão submetidas a dois tratamentos hídricos significativamente distintos, um ótimo e outro de estresse hídrico severo, e indicar os erros associados às estimativas.

## MATERIAL E MÉTODOS

As simulações numéricas com o modelo  $A_{g_s}$  foram feitas com dados obtidos em um experimento de campo conduzido com a cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar Pérola, sob duas condições hídricas significativamente distintas. A área experimental utilizada localiza-se no Campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP (22° 42' 30" S, 47° 38' 00" O, alt.: 546 m), e o solo é do tipo Nitossolo vermelho. A estação meteorológica automatizada da ESALQ localiza-se a 20 m da área experimental e forneceu os dados da condição atmosférica durante o experimento. O experimento foi realizado entre os meses de junho e setembro de 2010. A área de aproximadamente 990 m<sup>2</sup> (22 x 45 m) foi dividida em duas parcelas (22 x 22,5 m). Uma infraestrutura para irrigação por aspersão foi montada na área experimental. Uma parcela foi irrigada durante o ciclo todo da cultura (tratamento com irrigação plena - IP), enquanto a outra foi mantida sob déficit hídrico a partir da fase reprodutiva (tratamento com irrigação deficitária - ID). Durante os 91 dias do experimento de campo (15 de junho a 13 de setembro), houve a ocorrência de precipitação nos dias 13, 14 e 15 de julho (62,9 mm), depois somente em 7 de setembro (12,8 mm), durante o período de maturação. No período reprodutivo da cultura, entre 2 de agosto e 2 de setembro, somente o tratamento sob irrigação plena recebeu irrigação, e a ausência de chuva ocorrida promoveu um contraste grande entre os tratamentos, favorecendo a análise pretendida nesse estudo.

Os seguintes dados obtidos durante o experimento foram utilizados nas simulações com o modelo  $A_{g_s}$ : radiação fotossinteticamente ativa, saldo de radiação e vento, medidos pela estação meteorológica da ESALQ a cada 30 minutos; umidade relativa do ar, temperatura do ar e temperatura do dossel  $t_d$  (por termometria de infravermelho) medidas a cada 30 minutos em cada tratamento do experimento; e índice de área foliar em ambos os tratamentos estimado por um ceptômetro. Serão apresentadas nesse trabalho as simulações feitas para o dia 23 de agosto de 2010, embora as simulações para todo o período experimental podem ser encontradas em Durigon (2011), bem como os valores de variáveis utilizadas pelo modelo  $A_{g_s}$ , a descrição completa das equações do modelo e a programação numérica em Fortran.





Além dos dados necessários para as simulações, o potencial matricial da água do solo foi medido em 0,05, 0,1 e 0,3 m de profundidade em dois pontos de observação de cada tratamento hídrico, para possibilitar o acompanhamento da condição hídrica à qual as plantas estavam sendo expostas. Tais medidas foram feitas com tensiômetros de polímero (Bakker et al., 2007), equipamentos recentemente desenvolvidos capazes de medir o potencial matricial da água do solo em toda a faixa de interesse em estudos ambientais (0 a -160 m).

A validação das simulações foi feita a partir da comparação estatística entre a temperatura do dossel medida por termometria de infravermelho e estimada por balanço de energia a partir das estimativas da taxa de transpiração das plantas pelo modelo  $Ag_s$ . Os índices estatísticos utilizados foram a raiz quadrada do erro quadrático médio das previsões  $RMSEP$  e o coeficiente de eficiência  $E$  (Nash e Sutcliffe, 1970), dados por:

$$RMSEP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{d,i} - \hat{t}_{d,i})^2}{n}} \quad \text{e} \quad E = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (t_{d,i} - \hat{t}_{d,i})^2}{\sum_{i=1}^n (t_{d,i} - \bar{t}_d)^2} \quad [1]$$

em que  $t_d$  e  $\hat{t}_d$  são os valores observado e estimado da temperatura do dossel, respectivamente,  $\bar{t}_d$  é a média das observações e  $n$  é o número total de observações.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No dia 23 de agosto de 2010, um dia de céu claro e de inverno, as plantas do tratamento com irrigação deficitária não recebiam irrigação há 21 dias. A demanda atmosférica por vapor d'água estava alta devido às altas temperaturas do ar, de até 32 °C, e ao alto déficit de pressão de vapor, que chegou a aproximadamente 38 hPa. Com a temperatura do ar levemente superior sobre o tratamento com irrigação deficitária, o déficit de pressão de vapor nesse tratamento apresentou-se mais elevado que o observado no tratamento com irrigação plena nos horários mais quentes do dia. Às 14 horas, por exemplo, o déficit de pressão de vapor observado no tratamento com irrigação deficitária foi 2,4 hPa superior ao observado no tratamento com irrigação plena. O potencial matricial da água do solo atingiu valores inferiores a -160 m na camada superior do solo do tratamento com irrigação deficitária, enquanto que no tratamento com irrigação plena os potenciais mantiveram-se próximos a 0 m. As simulações de assimilação líquida de  $CO_2$   $A$ , condutância estomática  $g_s$  e taxa de transpiração  $T$  apresentaram um padrão consistente com a condição hídrica do solo e da atmosfera de 23 de agosto de 2010, e seus valores corroboram medições feitas em plantas de feijão, como citado em Paiva et al. (2005) e em Santos et al. (2006). Na Figura 1 são apresentadas as simulações de  $A$ ,  $g_s$ , e  $T$ , e os valores de déficit de umidade específica  $D_s$ , calculado pela diferença entre a umidade específica de saturação à temperatura do dossel e a umidade específica do ar e que representa a demanda atmosférica por vapor d'água no modelo  $Ag_s$ . Como se observa na figura,  $D_s$  foi até 16 g kg<sup>-1</sup> superior no tratamento com irrigação deficitária em relação ao tratamento com irrigação plena. De maneira geral, as variáveis simuladas apresentaram valores superiores para o tratamento com irrigação plena, mostrando que as plantas do tratamento com irrigação deficitária encontravam-se nesse dia sob efeito de estresse hídrico. As simulações de  $A$  para as plantas do tratamento com irrigação deficitária





XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – XVIII CBA  
2013 e VII Reunião Latino Americana de Agrometeorologia  
Belém - PA, Brasil, 02 a 06 de Setembro 2013  
Cenários de Mudanças Climáticas e a Sustentabilidade  
Socioambiental e do Agronegócio na Amazônia



mostraram uma redução significativa durante as horas mais quentes do dia, no mesmo momento que as plantas do tratamento com irrigação plena mantiveram uma taxa de assimilação líquida de  $\text{CO}_2$  que segue a curva de radiação fotossinteticamente ativa (dados não mostrados). A taxa de transpiração das plantas do tratamento com irrigação deficitária sofreu uma grande redução durante as horas mais quentes do dia em resposta ao aumento da resistência estomática a partir das 9:30 horas, dada a reduzida disponibilidade hídrica do solo e a elevada demanda atmosférica por vapor d'água ( $D_s$ ) neste tratamento. A depressão do meio-dia da taxa de transpiração foi observada nas plantas do tratamento com irrigação plena entre as 13:30 e 14:30 horas. Esse efeito é comumente observado em plantas com suficiente disponibilidade de água no solo, mas que fecham seus estômatos reduzindo a taxa de transpiração somente em função da alta demanda atmosférica por vapor d'água. Essa foi a condição experimentada pelas plantas do tratamento com irrigação plena, e o efeito da depressão do meio-dia da taxa de transpiração foi adequadamente simulada pelo modelo  $A_{gs}$ , com o aumento da resistência estomática a partir das 9:30 horas e uma redução na demanda atmosférica (redução de  $D_s$ ) em torno das 14 horas.

As medidas de temperatura do dossel por termometria de infravermelho e as estimativas da temperatura do dossel por balanço de energia são apresentadas na Figura 2 para ambos os tratamentos hídricos. A comparação dessas medidas e estimativas foi utilizada para validar as simulações feitas com o modelo  $A_{gs}$ . As medidas da temperatura do dossel apresentaram uma tendência semelhante, com o valor máximo observado em torno das 13:30 horas. No entanto, as plantas do tratamento com irrigação deficitária atingiram temperaturas até  $10^\circ\text{C}$  superiores às plantas do tratamento com irrigação plena. Isso ocorre porque as plantas com condição hídrica limitante disponibilizam de mais energia para o processo de aquecimento, enquanto que as plantas com suficiente disponibilidade hídrica utilizam mais energia no processo de transpiração. Embora a curva diurna de temperatura do dossel tenha sido estimada corretamente para ambos os tratamentos, as simulações de  $t_d$  apresentam erros estatísticos significativos quando comparadas às medidas. O coeficiente de eficiência  $E$  foi igual a 0,31 para o tratamento com irrigação deficitária e a -1,32 para o tratamento com irrigação plena, e o  $RMSEP$  foi igual a  $6,45^\circ\text{C}$  para o tratamento com irrigação deficitária e igual a  $8,25^\circ\text{C}$  para o tratamento com irrigação plena.





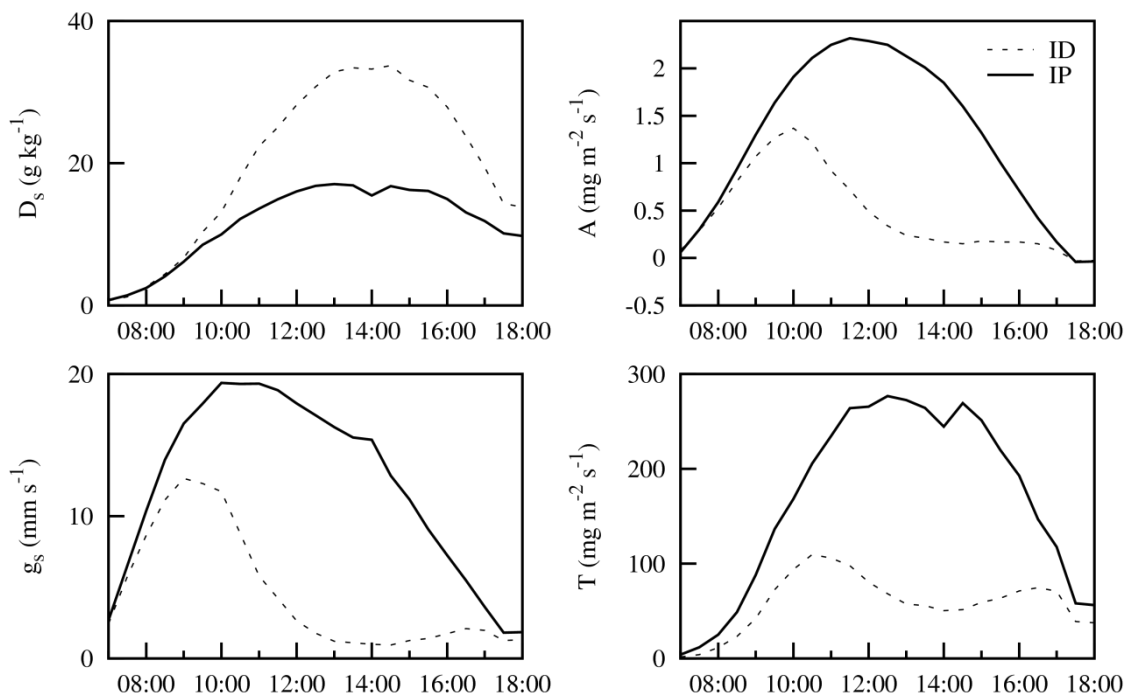


Figura 1 – Déficit de umidade específica  $D_s$  e estimativas da taxa de transpiração das plantas  $T$ , da assimilação líquida de  $CO_2$   $A$  e da condutância estomática  $g_s$  para o dia 23 de agosto de 2010 e para os tratamentos com irrigação deficitária (linha tracejada) e com irrigação plena (linha contínua).

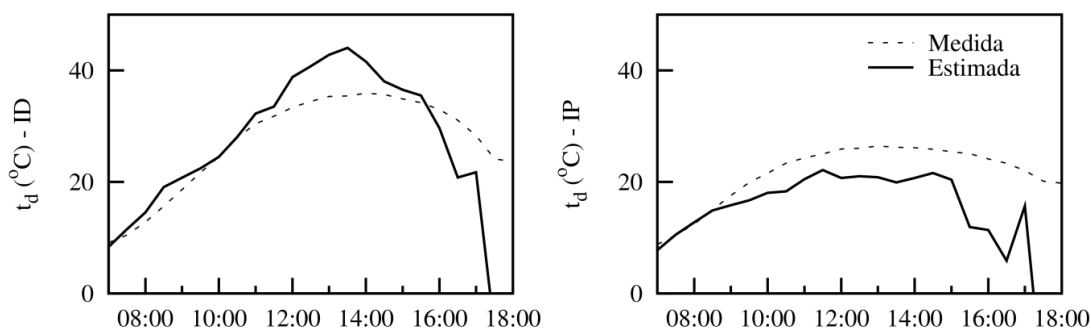


Figura 2 – Temperatura do dossel medida por termometria de infravermelho (linha tracejada) e estimada por balanço de energia (linha contínua) para o dia 23 de agosto de 2010 e para os tratamentos com irrigação deficitária (esquerda) e com irrigação plena (direita).

## CONCLUSÕES

As simulações da taxa de transpiração de plantas sob condições hídricas distintas feitas pelo modelo  $Ag_s$  de Jacobs (2004) apresentam as características observadas em medições, embora o erro estatístico associado a essas simulações, encontrado no processo de validação, seja significativo. Apesar do tratamento mecânico do modelo para a estimativa da condutância estomática, da assimilação líquida de  $CO_2$  e da taxa de transpiração das plantas, o tratamento



semi-empírico de variáveis importantes para as estimativas pode ser indicado como o fator que reduz a qualidade das simulações.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da CAPES – Universidade de Wageningen (Cooperation Agreement, proj. 019/06 e 5100184), e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (proj. 2009/02117-1 e 2011/09316-8).

## REFERÊNCIAS

- Bakker, G.; Van der Ploeg, M.J.; De Rooij, G.H.; Hoogendam, C.W.; Gooren, H.P.A.; Huiskes, C. 2007. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down the wilting point. *Vadose Zone Journal* 6: 196-202.
- Calvet, J.-C.; Noilhan, J.; Roujean, J.-L.; Bessemoulin, P.; Cabelguenne, M.; Olioso, A.; Wigneron, J.-P. 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology* 92: 73-95.
- Durigon, A. Soil-plant-atmosphere water transfer mechanisms and their relation to crop water stress. 145p. Tese – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- Goudriaan, J.; Van Laar, H.H.; Van Keulen, H.; Louwerse, W. Photosynthesis, CO<sub>2</sub> and plant production. p. 107-122. *In* Day, W.; Atkin, R.K. (ed.). *Wheat Growth and Modeling*. Plenum Press, 1985.
- Jacobs, C.M.J. Direct impact of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment on regional transpiration. 177p. Tese - Agricultural University, Wageningen, 1994.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
- Paiva, A.S.; Fernandes, E.J.; Rodrigues, T.J.D.; Turco, J.E.P. 2005. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. *Engenharia Agrícola* 21(1): 161-169.
- Santos, M.G.; Ribeiro, R.V.; Teixeira, M.G.; Oliveira, R.F.; Pimentel, C. 2006. Foliar phosphorous supply and CO<sub>2</sub> assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water deficit. *Brazilian Journal of Plant Physiology* 18(3): 407-411.
- Van Dam, J.C.; Groenendijk, P.; Hendriks, R.F.A.; Kroes, J.G. 2008. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal* 7: 640-653.

