



## **APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS**

Tirzah Moreira de Melo<sup>1</sup>; José Antônio Louzada<sup>2</sup>

### **RESUMO**

O entendimento dos processos de fluxo e armazenamento de água no solo é extremamente importante, pois permite planejar e gerenciar o uso dos recursos hídricos no sistema solo-planta-atmosfera. Diversos modelos denominados agro-hidrológicos são empregados com essa finalidade, sejam eles de domínio público ou comerciais, simples ou complexos. No presente trabalho, dois modelos públicos, SWAP e HYDRUS 1D, amplamente utilizados em simulações unidimensionais do fluxo de água foram aplicados para quantificar o balanço hídrico em dois cenários agrícolas significativamente distintos. A partir dos seus resultados, os modelos foram avaliados tendo como referência dados observados de profundidades do lençol freático e drenagem pela base do perfil do solo. As avaliações indicaram um bom desempenho de ambos os modelos, expresso por meio dos coeficientes estatísticos adotados. Adicionalmente, os resultados dos dois modelos relativos a outras variáveis não observadas em campo foram comparados entre si. A aderência foi muito boa tanto para os perfis de umidade como para os valores de evaporação calculados.

**Palavras-chave:** Fluxo de água, simulação, desempenho dos modelos.

## **APPLYING AND ASSESSING SWAP AND HYDRUS 1D MODELS IN DIFFERENT AGRICULTURAL SCENARIOS**

### **ABSTRACT**

The understanding of water flow and storage processes in the soil is extremely important once it provides means for an effective water resource planning and management within soil-crop-atmosphere system. Several agro hydrologic models are used for this purpose, irrespective of whether they are public or commercial, simple or complex. In the present paper, two public models - SWAP and HYDRUS 1D, widely utilized in one-dimensional water flow simulations, were applied for quantifying the water balance under two significantly distinct agricultural scenarios. Based on the results, the models were then evaluated through comparisons with the observed groundwater levels and drainage through the bottom of the soil profile. The results showed good performance of both models, expressed by means of the adopted statistics. Additionally, the results provided by the two

---

<sup>1</sup> Engenheira de Bioprocessos e Biotecnologia, M.Sc e Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: [tirzahmelo@hotmail.com](mailto:tirzahmelo@hotmail.com);

<sup>2</sup> Prof. D.Sc. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: [louzada@iph.ufrgs.br](mailto:louzada@iph.ufrgs.br).

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS

models concerning other variables not observed in the field were compared among themselves. Good adherence was found for moisture profiles as well as for the calculated evaporation values.

**Keywords:** Water flow, simulation, models performance.

### INTRODUÇÃO

O estudo do fluxo da água no solo é extremamente importante para o entendimento do comportamento do sistema solo-planta-atmosfera. Os processos de infiltração, evapotranspiração, redistribuição interna e drenagem definem o balanço hídrico no solo.

Atualmente existem diversos modelos que contabilizam esses fluxos, os quais podem ser divididos, basicamente,

em dois grupos (Adekalu & Fapohunda, 2007): (1) modelos físicos que envolvem a solução numérica da equação de Richards (Richards, 1931) e (2) modelos semi-empíricos que consideram uma ou multicamadas para o balanço de massa, e admitem que a água só é transportada se a umidade correspondente à capacidade de campo for superada. Exemplos de modelos dos tipos (1) e (2) são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Modelos mecanicistas e modelos conceituais de fluxo e transporte de água e contaminantes no solo.

Modelos Físicos - Tipo 1		Modelos Semi-empíricos - Tipo 2	
Modelo	Autores	Modelo	Autores
CROPSYST	Stöckle et al. (2003); Stöckle & Nelson (2005)	ALHyMUS	Facchi et al (2004); Facchi (2004)
ECOSYS	Grant (1995)	CERES	Ritchie (1998)
HYDRUS	Šimůnek et al. (2005)	CRPSM	Hill et al. (1996)
LEACHW	Hutson & Wagenet (1995)	EPIC	Sharpley & Williams (1990)
MACRO	Larsbo & Jarvis (2003)	STICS	Brisson et al. (2003)
RZWQM	Ahuja et al. (2000)	SWAT	Neitsch et al. (2005); Milly (1994)
SIMULAT	Diekkrüger & Arning (1995)	WEPP	Flanagan & Livingston (1995)
SWAP	Van Dam (2000)	WOFOST	Supit et al. (1994)
WATCOM	Vanclouster et al. (1994)		

Recentemente, pode-se encontrar na literatura inúmeros trabalhos que comparam modelos do tipo (1) ou fazem comparações entre modelos dos tipos (1) e (2). A escolha do modelo dependerá da disponibilidade de dados e recursos e dos objetivos do estudo, levando-se em conta quão complexos ou rígidos eles serão. Adekalu & Fapohunda (2007) compararam o modelo WATCOM com o modelo CRPSM na estimativa do armazenamento de água no solo e da evapotranspiração da cultura. De forma geral, ambos os modelos obtiveram boa concordância com os dados

observados em campo com relação ao armazenamento da água. No entanto, um melhor desempenho foi obtido com o modelo WATCOM, principalmente no que se refere à evapotranspiração, que foi estimada de forma insatisfatória pelo segundo modelo. As diferenças foram atribuídas ao fato de que o modelo CRPSM não leva em conta o armazenamento de água no solo no início do período seco, além de também não considerar o fluxo ascendente de água das camadas mais úmidas e profundas para as camadas mais secas e rasas no perfil do solo.

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS

Trabalho semelhante foi realizado por Gandolfi et al. (2006), quando compararam o armazenamento de água até a profundidade de 1 m e o fluxo na base do perfil estimados pelo modelo SWAP e pelos modelos SWRRB e ALHyMUS. Os autores observaram que o nível do lençol freático não influencia os padrões de umidade no solo nestes dois últimos, enquanto que o mesmo não ocorre com o SWAP. Além disso, os resultados obtidos por SWRRB e ALHyMUS divergem dos obtidos pelo SWAP quando o conteúdo de água no solo se aproxima da saturação. Os autores citam que o modelo SWRRB deve ser usado com cautela em solos de textura mais grosseira, devido a possíveis efeitos de descontinuidade da função de condutividade hidráulica.

Parsinejad & Feng (2003) compararam os modelos LEACHW e ECOSYS com relação ao conteúdo de água no solo após eventos de precipitação intensa. Ambos os modelos são do tipo 1. Enquanto o primeiro trabalha com uma discretização uniforme do perfil (compartimentos de mesma espessura), o segundo emprega um incremento temporal não-variável. Quando comparados com os dados observados, os resultados demonstraram que o modelo LEACHW subestimou os fluxos de drenagem e, em contraste, o modelo ECOSYS indicou maior dinamismo nos fluxos entre as camadas, principalmente na superfície do solo.

Como pode ser observado, mesmo os modelos que apresentam uma base comum sobre a representação do fluxo de água respondem de formas distintas, embora sendo aplicados às mesmas condições climatológicas, agronômicas e pedológicas. Tais diferenças podem ser originárias de uma série de fatores, dependendo dos modelos e em que condições estes estão sendo comparados. Scanlon et al. (2002) compararam sete modelos em solos sem cultura, sendo que as maiores diferenças entre valores observados e simulados do conteúdo de

água no solo foram devido à parametrização da curva de retenção de água, às condições de contorno na superfície durante a precipitação e às condições de contorno na base do perfil.

Já com relação a um solo vegetado, Eitzinger et al (2004) compararam a eficiência dos modelos CERES (Tipo 2), WOFOST (Tipo 2) e SWAP (Tipo 1) com relação ao conteúdo de água e à produtividade da cevada e do trigo. Neste caso, a parametrização da evapotranspiração e da cultura demonstrou ser o fator mais impactante sobre o desempenho dos modelos. Adicionalmente, como citado por Bonfante et al. (2010), a discretização espacial do perfil próximo à superfície do solo e os métodos de obtenção da média das condutividades hidráulicas representam fatores que podem afetar fortemente os resultados dos modelos.

Tendo em vista todas estas implicações sobre o uso de diferentes modelos e seus desempenhos em simular variáveis com precisão em relação a dados observados em campo, o presente trabalho teve por objetivo aplicar e avaliar os modelos SWAP e HYDRUS 1D (ambos do tipo 1), considerando dois cenários agrícolas significativamente diferentes. Estes cenários foram representados por condições de contorno distintas na base do perfil: 1) fluxo livre: simulação da lâmina de água drenada pela base do perfil em um lisímetro – superfície do solo com vegetação; e 2) camada impermeável: simulação do nível do lençol freático acima da camada impermeável – superfície do solo sem vegetação.

A aplicação dos modelos em situações expressivamente diferentes visou verificar o desempenho dos modelos quando utilizados para representar diferentes condições de contorno. Como citado por Wesseling et al. (1998), as condições de contorno na superfície e no fundo do perfil do solo são cruciais para aplicação do modelo SWAP. Além disso, a aplicação de modelos públicos

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS

unidimensionais, como são os modelos SWAP e HYDRUS 1D, permitirá avaliar a possibilidade de usá-los no lugar de

modelos comerciais e mais sofisticados, como, por exemplo, o modelo HYDRUS 2D/3D.

### MATERIAL E MÉTODOS

Os modelos unidimensionais de fluxo de água HYDRUS 1D e SWAP empregados

neste trabalho resolvem a equação de Richards na forma que segue:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S \quad (1)$$

em que:  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água no solo ( $L^3L^{-3}$ );  $h$  = potencial matricial (L);  $t$  = tempo (T);  $z$  = profundidade ao longo do perfil do solo (L);  $K(h)$  = condutividade hidráulica não saturada ( $LT^{-1}$ ); e  $S$  = termo que representa a extração de água pelo sistema radicular das plantas.

As propriedades hidráulicas do solo foram modeladas pelas relações propostas por Mualem (1976) em combinação com a função de retenção de água introduzida por van Genuchten (1980):

$$K(h) = K_s S_e^\lambda [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (2)$$

$$S_e(\theta) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (4)$$

em que:  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada ( $LT^{-1}$ );  $S_e(\theta)$  é a saturação relativa (-);  $\theta_s$  é a umidade de saturação ( $L^3L^{-3}$ );  $\theta_r$  é a umidade residual ( $L^3L^{-3}$ );  $h$  é o potencial matricial (-L);  $m$ ,  $n$  e  $\lambda$  são fatores empíricos de forma (-), em que  $m = 1 - 1/n$  e  $\alpha$  é um parâmetro de forma ( $L^{-1}$ ).

Os modelos SWAP e HYDRUS 1D têm um amplo histórico de aplicações e são muito bem documentados. Algumas de suas principais diferenças incluem o próprio esquema numérico para solução da equação de Richards, a simulação do fenômeno da histerese, o modelo de extração de água pelo sistema radicular das culturas e o cálculo da evaporação.

Os modelos SWAP e HYDRUS 1D foram aplicados em duas situações, as quais encontram-se abaixo relatadas.

#### Lisímetro

A primeira aplicação dos modelos foi realizada com base nos dados de um lisímetro instalado em uma área experimental localizada em Santa Catarina, no município de Lontras, mais especificamente na Bacia do Ribeirão Concórdia. O lisímetro contém uma amostra indeformada com volume de  $1m^3$  representativa do solo predominante da bacia. Esse solo foi classificado como Cambissolo (EPAGRI, 2005). A operação do lisímetro iniciou em 2008, com registros sistemáticos de precipitação, escoamento superficial, drenagem pela base e potencial matricial. O período total simulado foi de 1º de março de 2008 a 21 de julho de 2009, com presença da cultura do milho de 11 de novembro de 2008 a 8 de abril de 2009.

Dentre as variáveis observadas, a que apresenta um menor número de falhas corresponde à lâmina diária drenada pela

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS

base do lisímetro (fluxo no fundo do perfil) e, por isso, foi escolhida para comparação com os valores da mesma variável calculados pelos modelos. As comparações

$$\text{COE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_o^i - E_s^i)^2}{\sum_{i=1}^n (E_o^i - E_m)^2} \quad (5)$$

$$\text{ER} = \frac{|V_o - V_s|}{V_o} \quad (6)$$

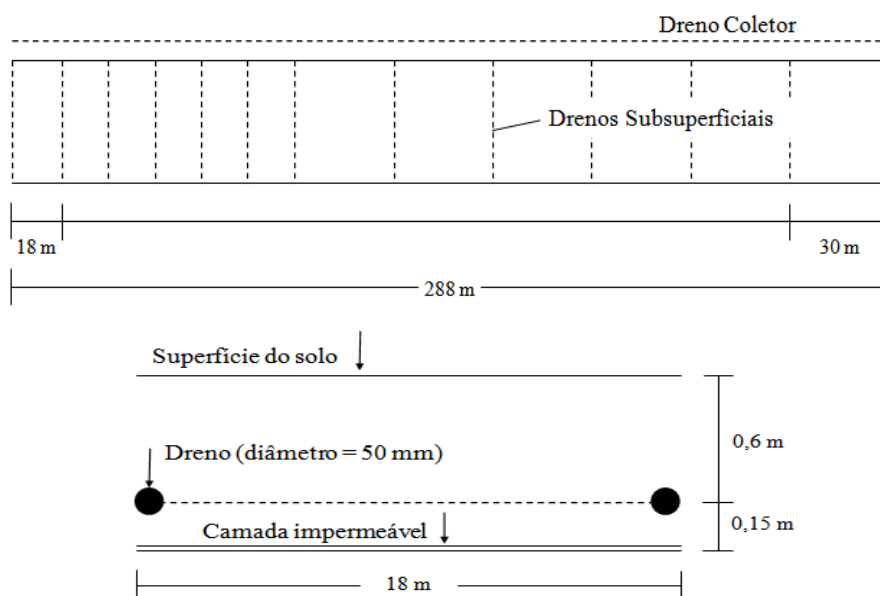
em que:  $E_o$  = lâmina drenada pela base observada no tempo  $i$ ;  $E_s$  = lâmina drenada pela base simulada no tempo  $i$ ;  $E_m$  = lâmina média observada drenada pela base;  $V_o$  = montante acumulado da lâmina observada drenada pela base no período de tempo considerado;  $V_s$  = montante acumulado da lâmina simulada drenada pela base no período de tempo considerado;  $n$  = número de intervalos de tempo.

### Área com drenagem sub-superficial

A segunda aplicação dos modelos foi feita com dados de um solo típico das várzeas do Estado do Rio Grande do Sul que ocorre no complexo da Estação Experimental do Arroz (EEA) do IRGA (Instituto Rio Grandense de Arroz), região

metropolitana de Porto Alegre. Trata-se de uma área experimental de 1 ha que conta com um sistema de drenagem subsuperficial e superfície sistematizada. Este solo foi classificado como Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico (EMBRAPA, 1999), sendo o clima da região classificado como Cfa segundo a classificação de Köppen (Kuinchner & Buriol, 2001).

Os esquemas contidos na Figura 1 apresentam as principais características do sistema de drenagem. O desempenho dos modelos foi avaliado comparando-se as profundidades do lençol freático observadas no ponto médio entre dois drenos com os valores calculados da mesma variável.



**Figura 1:** Planta baixa e corte transversal da área experimental de drenagem.

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS

Os índices estatísticos para avaliação foram o coeficiente de Nash-Sutcliffe (Equação 5) e a raiz quadrada do erro

$$RMSE = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (O_s^i - O_o^i)^2 / n \right]^{1/2}}{O_m} \quad (7)$$

em que:  $O_o$  = profundidade do lençol freático observada no tempo  $i$ ;  $O_s$  = profundidade do lençol freático simulada

médio quadrático normalizado (Equação 7).

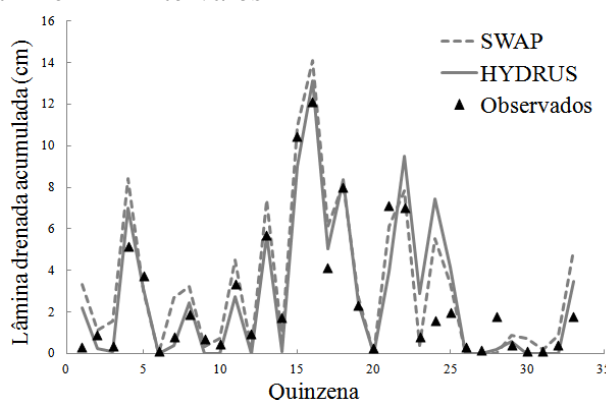
no tempo  $i$ ;  $O_m$  = profundidade média observada do lençol freático;  $n$  = número de intervalos de tempo.

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### Lisímetro

Nesta aplicação, os dados observados da lâmina drenada pela base do lisímetro acumulada em intervalos

quinzenais (33 no total), com exceção ao último intervalo que foi de 21 dias, foram comparados com os resultados obtidos pelos modelos SWAP e HYDRUS 1D. Os resultados estão apresentados na Figura 2.



**Figura 2:** Comparação entre lâminas drenadas observadas e simuladas pelos modelos.

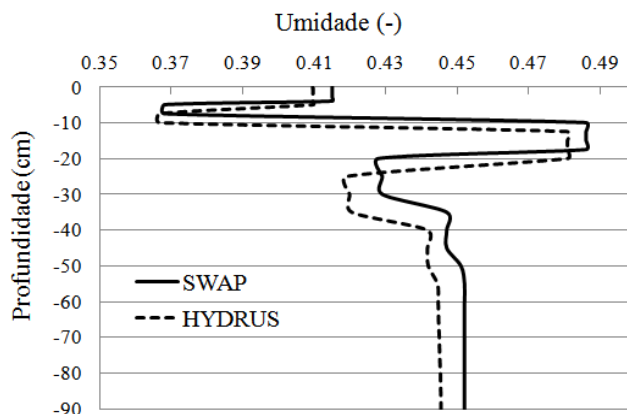
Pode-se verificar que ambos os modelos, com exceção de alguns poucos pontos, reproduzem bem o comportamento dos dados observados ao longo do tempo, além de que tanto o HYDRUS quanto o SWAP são praticamente idênticos para algumas quinzenas.

A confirmação analítica desta inspeção visual foi feita através dos índices estatísticos considerados. O modelo SWAP forneceu COE = 0,765 e ER = 0,266, enquanto que o modelo HYDRUS 1D forneceu COE = 0,744 e ER = 0,08. Neste caso, o COE (valor ideal = 1) foi calculado para as lâminas drenadas pela base do

lisímetro acumuladas em cada quinzena, e o ER (valor ideal = 0) refere-se a todo o período de simulação. Nota-se que embora o SWAP tenha apresentado um desempenho um pouco melhor representado pelo COE, o modelo HYDRUS forneceu um erro (ER) de apenas 8 % com relação aos dados observados.

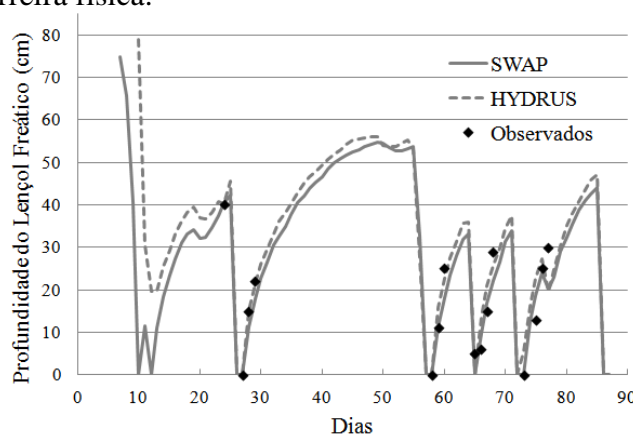
Comparou-se também os resultados de umidade dos modelos entre si. Neste caso, a umidade ao longo do perfil do solo apresentada na Figura 3 mostra esta comparação para o último dia do período simulado.

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS



**Figura 3:** Perfil de umidade do solo obtido pelos modelos SWAP e HYDRUS.

Observa-se pela Figura 3 uma pequena defasagem entre as curvas, indicando que a distribuição de água proveniente da superfície simulada pelos modelos ocorre de forma semelhante ao longo do perfil do solo. Adicionalmente, os dois modelos indicam que a partir da profundidade de 40 cm ocorre um gradiente unitário até a base do perfil, característico de uma situação em que se tem um lisímetro sem a formação de lençol freático ou alguma barreira física.



**Figura 4:** Comparação entre profundidades do lençol freático observadas e simuladas pelos modelos.

Da mesma forma, as comparações para o nível do lençol freático foram muito satisfatórias para ambos os modelos. Nesse caso, o modelo SWAP apresentou maior dinamismo na distribuição de água, pois o lençol freático formou-se 3 dias antes do que no modelo HYDRUS, porém ambos, depois disso, revelaram valores muito semelhantes. Com relação aos índices estatísticos, o modelo SWAP forneceu

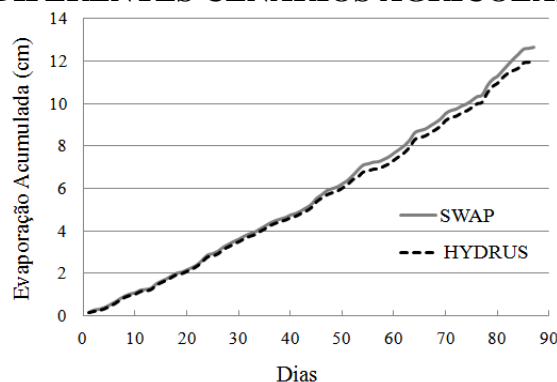
### Área com drenagem sub-superficial

Neste segundo caso, a variável de referência foi o nível do lençol freático, formado em função da presença na base do perfil de uma camada impermeável (condição de contorno). Os resultados são apresentados na Figura 4. Foram simulados 87 dias e estes resultados comparados com 15 dados observados ao longo dos três meses de estudo.

COE = 0,862 e RMSE = 0,283, enquanto que o modelo HYDRUS 1D forneceu COE = 0,834 e RMSE = 0,311. Estes resultados ratificaram a boa concordância identificada visualmente na Figura 5.

Neste caso a evaporação acumulada simulada foi comparada nos dois modelos entre si. A Figura 5 apresenta esta comparação durante o período simulado.

## APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS



**Figura 5:** Comparação entre as evaporações acumuladas simuladas.

Os resultados foram muito semelhantes mesmo que tenham sido calculados de forma distinta pelos modelos. Os valores totalizados, ao redor de 120 mm, são muito próximos do valor potencial. Isso decorreu dos altos valores de umidade verificados na camada superior do solo, o que não permitiu reduções drásticas na condutividade hidráulica e no potencial matricial. O SWAP utiliza a equação de Darcy, onde considera um potencial atmosférico constante para obtenção da taxa máxima de evaporação. Desta forma, se a evaporação máxima ( $E_{max}$ ) exceder a evaporação potencial ( $E_p$ ), então o modelo assume  $E=E_p$ , caso contrário  $E=E_{max}$ .

Já no modelo HYDRUS o usuário deve informar o potencial na superfície do solo abaixo do qual a evaporação real não será mais a potencial. Nota-se que ao contrário do SWAP, neste caso a evaporação não depende da discretização

do perfil próximo à superfície e esta pode ser uma razão para as pequenas diferenças entre os modelos no cálculo da evaporação.

### CONCLUSÕES

As comparações realizadas entre os modelos SWAP e HYDRUS para dois cenários agrícolas caracterizados por condições de contorno consideravelmente distintas permitiram concluir que ambos os modelos tiveram um bom desempenho, tanto para estimar a lâmina drenada pela base do lisímetro quanto a profundidade do lençol freático.

Ressalta-se também que os bons resultados dos modelos comparados aos valores observados foram obtidos sem calibrá-los. Isso é muito significativo, já que invariavelmente não há dados registrados que permitam a calibração de modelos dessa natureza.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEKALU, K. O.; FAPOHUNDA, H. O. Comparisons of two soil water flow models under variable irrigation. **Irrigation Science**, v. 25, p. 375-385, 2007.
- AHUJA, L. R.; ROJAS, K. W.; HANSON, J. D.; SHAFFER, J. J.; MA, L. **Root zone water quality model. Modelling Management Effects on Water Quality and Crop Production**. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, USA, 2000. 360p.
- BONFANTE, A.; BASILE, A.; ACUTIS, M.; MASCELLIS, R.; MANNA, P.; PEREGO, A.; TERRIBILE, F. SWAP, CropSyst and MACRO comparison in two contrasting soils cropped with maize in Northern Italy. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 1051-1062, 2010.
- BRISSON, N.; GARY, C.; JUSTES, E.; ROCHE, R.; MARY, B.; RIPOCHE,



**APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM  
DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS**

- D.; ZIMMER, D.; SIERRA, J.; BERTUZZI, P.; BURGER, P.; BUSSIÈRE, F.; CABIDOCHÉ, Y. M.; CELLIER, P.; DEBAEKE, P.; GAUDILLÈRE, J. P.; HÉNAULT, C.; MARAUX, F.; SEGUIN, B.; SINOQUET, H. An overview of the crop model STICS. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p.309-332, 2003.
- DIEKKRÜGER, B. & ARNING, M. Simulation of water fluxes using different methods for estimating soil parameters. **Ecological Modelling**, v. 81, p. 83-97, 1995.
- EITZINGER, J.; TRNKA, M.; HÖSCH, J.; ŽALUD, Z.; DUBROVSKÝ, M. Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions. **Ecological Modelling**, v. 171, p. 223-246, 2004.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília. 1999. 412 p.
- EPAGRI. Empresa de Pesquisa Agropecuária e de Extensão Rural de Santa Catarina. Inventário de Terras – Microbacia Concórdia, Lontras – SC. **Programa de Recuperação Ambiental e de Apoio ao pequeno produtor Rural**. Florianópolis, 2005. 54 p.
- FACCHI, A. **Nuove tecnologie per la pianificazione dell'irrigazione a scala di bacino**. 2004. Tesi di dottorato. Dottorato di ricerca di genio rurale, 16 ciclo. Facoltà di Agraria, Università di Milano 2004.
- FACCHI, A.; ORTUANI, B.; MAGGI, D.; GANDOLFI, C. Coupled SVAT-ground-water model for water resources simulation in irrigated alluvial plains. **Environmental Modelling and Software**, v. 19, n. 11, p. 1053-1063, 2004.
- FLANAGAN, D. C.; LIVINGSTON, S. J. **WEPP User Summary**, NSERL Report. National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette. No 11, 1995. 131p.
- GANDOLFI, C.; FACCHI, A.; MAGGI, D. Comparison of 1D models of water flow in unsaturated soils. **Environmental Modelling & Software**, n. 21, p. 1759-1794, 2006.
- GRANT, R. F. Dynamics of energy, water, carbon and nitrogen in agricultural ecosystems: simulation and experimental validation. **Ecological Modelling**, v. 81, p. 169-181, 1995.
- HILL, R. W.; HANKS, R. J. & WRIGHT, J. L. **Crop yield models adapted to irrigation schedules programs (CRPSM)**. Research Report. Utah State University, Logan, Utah, USA, 1996.
- HUTSON, J. L.; WAGENET, R. J. **LEACHM - Leaching Estimation and Chemistry Model, Version 3**. Nova York: State College of Agriculture and Life sciences, Cornell University, Ithaca, 1995.
- KUINCHTNER, A., BURIOL, G. A. Clima do Estado do Rio Grande do Sul segundo a classificação climática de Köppen e Thornthwaite. **Disciplinarum Scientia**, Série Ciências Exatas, S. Maria, v. 2, n.1, p. 171-182, 2001.
- LARSBO, M.; JARVIS, N. **MACRO 5.0**. A Model of Water Flow and Solute Transport in Macroporous Soil, Technical Description. 48p., 2003.
- MILLY, P. C. D. Climate, soil water storage, and the average annual water

**APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS MODELOS SWAP E HYDRUS 1D EM  
DIFERENTES CENÁRIOS AGRÍCOLAS**

- balance. **Water Resources Research**, v. 30, n. 7, p. 2143-2156, 1994.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**. v.12, n.3, p. 513–522, 1976.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Texas, 2005.
- PARSINEJAD, M.; FENG, Y. Field evaluation and comparison of two models for simulation of soil-water dynamics. **Irrigation and Drainage**, v. 52, p. 163-175, 2003.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous medium. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.
- RITCHIE, J. T. Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G. Y., HOOGENBOOM, G. & THORTON, P. K. (Eds.). **Understanding options for agricultural production**. Klumer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998. p.41-55.
- SCANLON, B. R.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R. C.; PORRO, I.; ŠIMŮNEK, J.; FLERCHINGER, G. N. Intercode comparisons for simulations water balance of surficial sediments in semiarid regions. **Water Resources Research**, v. 38, n. 12, 2002.
- SHARPLEY, A. N.; WILLIAMS, J. R. **EPIC – Erosion Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation**. ARS-31, USDA, 1990.
- ŠIMŮNEK, J.; van GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. **The HYDRUS – 1D Software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media, Version 4.08**. Riverside, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2005. 296p.
- STÖCKLE, C. O.; DONATELLI, M.; NELSON, R. CropSyst a cropping systems simulation model. **European Journal of Agronomy**, v. 18, p. 289-307, 2003.
- STÖCKLE, C. O.; NELSON, R. **CropSyst for Windows version 3.04.08**. Department of Biological Systems. Washington State University, 2005.
- SUPIT, I.; HOOYER, A. A.; van DIEPEN, C. A. System Description of the WOFOST 6.0 Crop Simulation Model Implemented. In: CGMS, vol 1. **Theory and algorithms**, EUR publication 15956. Agriculture Series, Luxembourg, 1994, 146p.
- VAN DAM, J.C. Field scale water flow and solute transport. SWAP model concepts, parameter estimation and case studies. PhD thesis, Wageningen Universiteit, 167 p., 2000.
- VANCLOOSTER, M.; VIAENE, P.; DIELS, J.; CHRISTIANS, K. WAVE – A mathematical model for simulating water and agrochemical in the soil and vadose environment. Institute for Land and Water Management, K. U. Leuven, Belgium, 1994.
- VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 44, p. 892–898, 1980.
- WESSELING, J. G.; KROES, J. G.; METSELAAR, K. **Global sensitivity analysis of the Soil-water-Atmosphere-Plant (SWAP) model**. Report 160. Wageningen: DLO-Staring Centre, 1998.