

## Simulação da Dinâmica da Água em Solo Cultivado com Feijão Caupi no Brejo Paraibano

Edevaldo Miguel Alves, André Maciel Netto, Antonio Celso Dantas Antonino

Departamento de Energia Nuclear, CTG, UFPE  
edevaldofisica@gmail.com, amnetto@ufpe.br, acda@ufpe.br

José Romualdo de Sousa Lima

Unidade Acadêmica do Agreste, UFRPE  
romualdo@uag.ufrpe.br

Eduardo Soares de Souza

Unidade Acadêmica do Serra Talhada, UFRPE  
eduardosouza@uast.ufrpe.br

Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Jaime Joaquim da Silva Perreira Cabral,  
Manuella Virginia Salgueiro Gondim

Departamento de Engenharia Civil, CTG, UFPE  
suzanam@ufpe.br, jaimejcabral@yahoo.com, manuellavirginia@yahoo.com.br

Recebido: 22/08/11 - revisado: 14/11/11 - aceito: 09/04/12

---

### RESUMO

O feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp.) apresenta enorme importância econômica e social para os agricultores do nordeste brasileiro e, portanto, o conhecimento da dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera é fundamental para os estudos sobre o uso de água pela cultura, proporcionando a otimização da produção. Existem diversas técnicas experimentais para o estudo da dinâmica da água, porém os elevados custos, a complexidade e o tempo de execução limitam o estudo destes processos o que faz a modelagem matemática de cenários ser bastante empregada, tanto na busca por conhecimento quanto na previsão de resultados. O objetivo deste trabalho foi simular a dinâmica da água no solo cultivado com feijão caupi por meio do programa Hydrus1D, nas diferentes fases fenológicas da cultura (emergência, vegetativa, reprodutiva e maturação). O Hydrus1D foi calibrado com o solo sem vegetação e com o solo vegetado, e depois utilizado na simulação da dinâmica da água em todas as fases fenológicas. O Hydrus1D simulou cada fase de forma satisfatória, com relação à umidade volumétrica do solo e apresentou bons resultados nas simulações da evolução do armazenamento de água e da evapotranspiração, que são importantes componentes do balanço hídrico.

**Palavras chaves:** umidade volumétrica, Hydrus1D, evapotranspiração, modelagem.

---

### INTRODUÇÃO

Dentre os diferentes produtos agrícolas encontrados nas regiões tropicais, o feijão caupi se destaca pelo alto valor nutritivo, além do baixo custo de produção, e de ser amplamente cultivado por pequenos produtores (Frota et al., 2008). No estado da Paraíba, o feijão caupi é cultivado em quase todas as microrregiões, numa área aproximada de 201.787 ha. Com produção aproximada de 101.146 t ano<sup>-1</sup> e rendimento médio de 501,25 kg ha<sup>-1</sup>, ocupa o primeiro lugar em área plantada no estado e exerce

efetiva participação na dieta alimentar da população, por constituir-se em excelente fonte de proteínas e carboidratos de baixo custo (Souza, 2005).

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada à produção vegetal e deste modo, a caracterização dos fatores que interferem no movimento da água no solo se torna imprescindível. O movimento da água no sistema solo-planta-atmosfera envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem interna e absorção da água pelas plantas, os quais podem ser medidos ou estimados pelo método do balanço hídrico (Lima et al., 2006a).

As principais vantagens das simulações numéricas são a facilidade de execução, os baixos custos e a rápida obtenção dos resultados. Simular as interações no sistema solo planta atmosfera é uma tarefa complexa devido a não-linearidade dos processos de transferências, a variedade de escalas envolvidas e as incertezas dos dados de entrada (Soares, 2009).

Existem diversos modelos matemáticos para simular as interações no sistema solo-planta-atmosfera. O Hydrus1D (Simunek et al., 2008) é um programa computacional que simula a dinâmica da água, o transporte de calor e de solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não. Desenvolvido por pesquisadores dos U. S. Salinity Laboratory e da Universidade da Califórnia em Riverside, o programa Hydrus1D foi utilizado para resolver uma ampla variedade de problemas, como por exemplo: a simulação dos termos do balanço hídrico, estimação de recarga, desempenho do solo em atividades de engenharia, lixiviação de nitratos e pesticidas e o transporte de hidrocarbonetos no solo (Scanlon, 2004).

Conhecendo a importância do feijão caupi no cenário agrícola nordestino, e sabendo que a dinâmica da água no solo é um fator determinante para a produção vegetal, o objetivo deste trabalho foi simular a dinâmica da água em um solo cultivado com feijão caupi nas quatro fases fenológica da cultura (emergência, vegetativa, reprodutiva e maturação), utilizando o programa Hydrus1D (versão 4.0), avaliando a influência das fases fenológicas da cultura nos fluxos de água, calibrando e validando o programa para as condições do nordeste do Brasil, por meio da comparação dos dados medidos experimentalmente e simulados pelo modelo.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Experimento de campo

As medidas necessárias para a simulação da dinâmica da água no solo foram realizadas por Lima (2004) e Souza (2005) em um Latossolo Amarelo (LA), numa área de 4,0ha da fazenda Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba no município de Areia, situado na microrregião do Brejo Paraibano, com localização de 6° 58'12"S e 35°42'15"W, e altitude de aproximadamente 619 m acima do nível do mar. O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo quente e úmido, com maiores

precipitações nos meses de Junho e Julho (Brasil, 1972).

No centro da área experimental foi montada uma estação meteorológica composta de um piranômetro para a medição da radiação solar global, um saldo radiômetro para medir o saldo de radiação, três sensores de temperatura e umidade relativa do ar, três sensores de velocidade do vento e um pluviômetro para a medida da precipitação pluviométrica. Também foram instalados nove sensores tipo TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) modelo CS615 da Campbell Scientific Inc., nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 e 120 cm para as medições das evoluções dos perfis de umidade volumétrica do solo. A curva de calibração utilizada foi a do próprio sensor, pois, Lima et al. (2006b), ao compararem a umidade volumétrica medida com esses sensores, na mesma área experimental, com medidas gravimétrica e de sonda de nêutrons, não encontraram diferença estatística entre os valores de umidade do solo. A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi calculada com a equação proposta por Penman-Monteith (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 u_2)} \quad (01)$$

Na qual  $R_n$  [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ] é o saldo de radiação,  $G$  [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ] é a densidade de fluxo de calor no solo,  $T$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] é a temperatura média do ar,  $u_2$  [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] é a medida da velocidade do vento à 2,0 m de altura,  $e_s$  [kPa] é a pressão de vapor à saturação,  $e_a$  [kPa] é a pressão de vapor,  $(e_s - e_a)$  [kPa] é o déficit de pressão de vapor,  $\Delta$  [ $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] é o parâmetro de inclinação da curva de pressão de vapor,  $\gamma$  [ $\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] é a constante psicrométrica.

Tabela 1 – Período de simulação e fases fenológicas.

Fase fenológica	Duração da fase	Período de simulação
Emergência	11 a 20/03/03	13 a 20/03/03
Vegetativa	21/03 a 29/04/03	11 a 17/04/03
Reprodutiva	30/04 a 20/05/03	05 a 11/05/03
Maturação	24 a 02/06/03	24 a 30/05/03

As simulações foram realizadas com os dados experimentais do solo cultivado com feijão caupi coletados no período de 11/03/2003 a 02/06/2003. O plantio da cultura foi realizado nos

dias 11 e 12/03/2003 e a colheita nos dias 27/05 a 02/06/2003. A tabela 1 apresenta os períodos de simulação para as fases fenológica do feijão.

### O Hydrus1D

No Hydrus1D, o fluxo unidimensional de água é descrito pela equação de Richards (1931):

$$C_{\psi_m} \frac{\partial \psi_m}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \cdot \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] - R \quad (02)$$

Em que  $C_{\psi_m}$  é a capacidade hidráulica ou capilar do solo,  $\psi$  e  $\psi_m$  são os potenciais total e matricial da água no solo respectivamente,  $\theta$  é a umidade volumétrica,  $t$  é o tempo,  $z$  é a coordenada vertical,  $R$  é a extração de água pelo sistema radicular da planta e  $K(\theta)$  é a curva de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

A extração de água pelo sistema radicular,  $R$ , é definida como o volume da água extraído pela planta, em um determinado volume de solo, por unidade de tempo, ou seja,  $R$  apresenta dimensões  $L^3L^{-3}T^{-1}$ . Segundo o modelo de Feddes et al. (1978)  $R$  é definido como:

$$R(\psi_m) = \gamma(\psi_m) R_p \quad (03)$$

Na qual,  $\gamma(\psi_m)$  é uma função resposta ao estresse hídrico ( $0 \leq \gamma \leq 1$ ) para explicar a redução da extração de água pelo sistema radicular devido ao estresse hídrico da planta proposta por Feddes et al. (1978).  $\gamma(\psi_m)$  é uma função do potencial matricial e  $R_p$  é a taxa de extração de água máxima, definida pela razão da taxa de transpiração máxima pela profundidade da zona radicular da cultura ( $R = T_M/L_R$ )

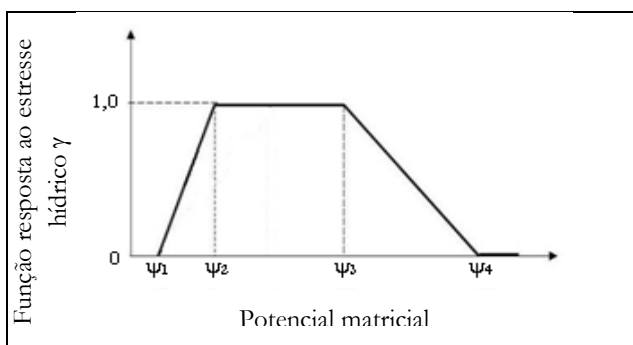


Figura 1 – Função da resposta do estresse hídrico em função do potencial matricial (Feddes et al., 1978).

A Figura 1 apresenta a função resposta ao estresse hídrico, na qual há uma variação linear na taxa de extração de água entre  $\psi_1$  e  $\psi_2$  (acréscimo) e entre  $\psi_3$  e  $\psi_4$  (decréscimo) devido à falta de aeração ou redução da água disponível para a planta, respectivamente; e entre os potenciais  $\psi_2$  e  $\psi_3$  as raízes extraem água a uma taxa máxima (Feddes et al., 1978).

No Hydrus1D, a solução da equação de Richards (Eq. 02) é feita por meio do método de elementos finitos, sujeita às condições iniciais e de fronteira, sendo para isso necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas do solo, como a curva de retenção  $\psi_m(\theta)$  e curva de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ . Para a simulação da dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi foram utilizadas as equações de van Genuchten para a curva de retenção e para a curva de condutividade hidráulica, com a hipótese de Mualem (1976) para relacionar os parâmetros de forma  $n$  e  $m$ , dadas por:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + (\alpha |\psi_m|)^n \right]^m} \quad (04)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot S_e^{0,5} \cdot \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (05)$$

$$\text{com, } S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

Em que,  $K_s$  é condutividade hidráulica do solo na condição de saturação,  $\alpha$ , é o inverso do potencial matricial crítico,  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são as umidades volumétricas residual e na saturação do solo, respectivamente.

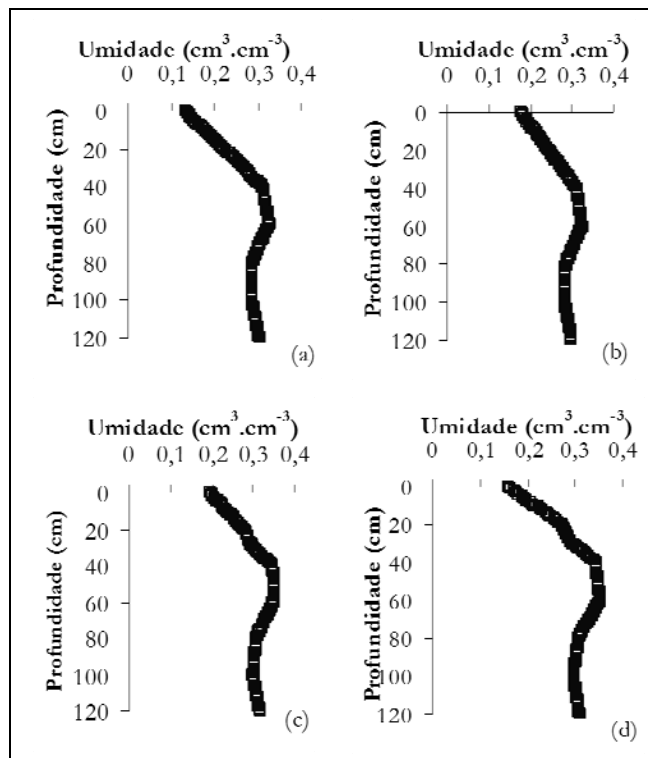
### Condições iniciais e de fronteira

A partir dos dados de umidade volumétrica obtidos experimentalmente, foi realizada uma interpolação linear, com o objetivo de estimar os valores de umidade volumétrica em cada centímetro de solo. Estabelecendo-se assim as condições iniciais, perfis de umidade volumétrica, usadas nas simulações para cada fase fenológica da cultura (Figura 2).

Os dados atmosféricos de entrada no modelo, para o limite superior do solo, foram a precipitação pluviométrica, a evapotranspiração de referência e o potencial crítico na superfície do solo, que

corresponde aproximadamente ao valor do potencial matricial de um solo seco ao ar (Antonino, 1988).

Para as condições de fronteira inferior, foram usados valores de umidade medidos na profundidade de 120 cm.



**Figura 2 – Condição inicial de umidade volumétrica do solo, para as fases (a) Emergência, (b) Vegetativa, (c) Reprodução (floração) e (d) Maturação.**

### Determinação dos parâmetros do solo

Para as simulações, considerou-se uma camada de solo com 120 cm de espessura. Ela foi discretizada com  $\Delta z$  constante e igual a 1,0 cm. O passo de tempo,  $\Delta t$ , usado foi variável, limitado por um dado valor mínimo ( $\Delta t_{min}$ ) e um dado valor máximo do passo de tempo ( $\Delta t_{max}$ ) (i.e.,  $\Delta t_{min} \leq \Delta t \leq \Delta t_{max}$ ).

O solo foi dividido, em função das propriedades hidráulicas  $\psi(\theta)$  e  $K(\theta)$ , em duas camadas, a primeira camada corresponde às profundidades de 0 à 40 cm e a segunda camada de 41 à 120 cm. Para  $\psi(\theta)$  e  $K(\theta)$ , os parâmetros de forma ( $n$  e  $m$ ) e de normalização ( $K_s$ ,  $\theta_s$  e  $\alpha$ ) foram determinados por Soares (2009) com o método Beerkan (Haverkamp et al., 1998; Souza et al., 2008). Para isso, foram realizados ensaios de infiltração em vários pontos da

parcela, nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, e a análise granulométrica do solo, por meio da qual foram determinados os diâmetros das partículas do solo. A umidade residual  $\theta_r$  foi assumida ser igual a zero (Antonino et al., 2005). O armazenamento de água no solo foi obtido por meio da área sobre o perfil de umidade volumétrica, integrando-se esta área por meio da regra do trapézio, considerando-se desde a superfície até a profundidade de interesse ( $z = 120$  cm).

As medidas de altura da planta foram realizadas, semanalmente, desde o estabelecimento até a colheita, em 10 plantas previamente selecionadas na área experimental. Também, foram realizadas coletas do sistema radicular da cultura para a determinação da profundidade e o comprimento das raízes no solo (Lima, 2004).

A partição da evapotranspiração máxima,  $ET_M$ , em transpiração máxima,  $T_M$ , e evaporação máxima,  $E_M$ , necessárias para a entrada no programa Hydrus1D, foi obtida conforme Ritchie (1972) :

$$T_M = ET_M \cdot (1 - e^{-k \cdot IAF}) \quad (06)$$

$$E_M = ET_M \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad (07)$$

$$\text{Com, } ET_M = ET_0 \cdot k_c \quad (07)$$

Em que,  $IAF$  é o índice de área foliar;  $k$  é uma constante que governa a absorção da radiação pela copa da cultura em função do ângulo do sol, a distribuição das plantas e do arranjo das folhas; e  $k_c$  é o coeficiente da cultura [-], determinado por Lima (2004) para a mesma cultura e local.

O índice de área foliar foi calculado com a equação de Medeiros et al. (2001):

$$IAF = 0,297 + 0,048 \cdot PC - 0,0000754 PC^2 \quad (08)$$

Em que,  $PC$  é a porcentagem de cobertura [-] determinada por Lima (2004) para a mesma cultura e local durante o ciclo da cultura.

### Análises de sensibilidade e desempenho estatístico

Uma análise de sensibilidade no programa Hydrus1D foi realizada com a finalidade de avaliar quais parâmetros do solo ou da planta requerem uma maior exatidão na sua determinação. Para isso, utilizou-se o método de superfície de resposta, em que várias simulações são realizadas apenas com a

modificação de um único parâmetro enquanto os demais parâmetros não são alterados. A análise de sensibilidade foi realizada nos seguintes parâmetros: o inverso da pressão de borbulhamento ( $\alpha$ ), o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros ( $n$ ), a condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) e os potenciais matriciais da água no solo do modelo de Feddes et. al. (1978) para extração de água pelo sistema radicular ( $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$  e  $\psi_4$ ). Os dados de saída avaliados foram a evapotranspiração acumulada ( $ET_{acum}$ ), a drenagem do solo na base do perfil (D), a evolução da umidade volumétrica ( $\theta$ ) e o armazenamento de água no solo (A).

Para a análise de desempenho do modelo, que avalia a concordância entre os dados experimentais e os valores simulados pelo Hydrus1D, utilizou-se o erro quadrático médio (EQM), o coeficiente de correlação ( $r$ ), O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o índice de concordância ( $d$ ) proposto por Willmott et al. (1985), dados por:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2 \quad (09)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(T_i - \bar{T}) \cdot (M_i - \bar{M})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N [(T_i - \bar{T})^2] \cdot \sum_{i=1}^N [(M_i - \bar{M})^2]}} \quad (10)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (T_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(|T_i - \bar{M}|) + (|M_i - \bar{M}|)]^2} \quad (11)$$

Nas quais,  $T_i$  representa os valores calculados pelo modelo,  $M_i$  representa os valores experimentais,  $\bar{M}$  é a média dos valores experimentais e  $N$  é o número de determinações.

De acordo com Santos & Camargo (2006), o "r" indica a precisão do modelo, ou seja, quanto da variação da variável dependente é explicada por aquela das variáveis independentes. O índice "d", com variação entre 0 e 1, indica o grau de exatidão entre os valores estimados e observados, quanto

mais próximo de 1, melhor a exatidão do modelo em estimar a variável dependente

## RESULTADOS

### Análise de Sensibilidade

A variação da umidade volumétrica do solo em função da variação dos parâmetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $K_{s1}$ ,  $K_{s2}$ ,  $n_1$  e  $n_2$  é apresentada na Figura 3.

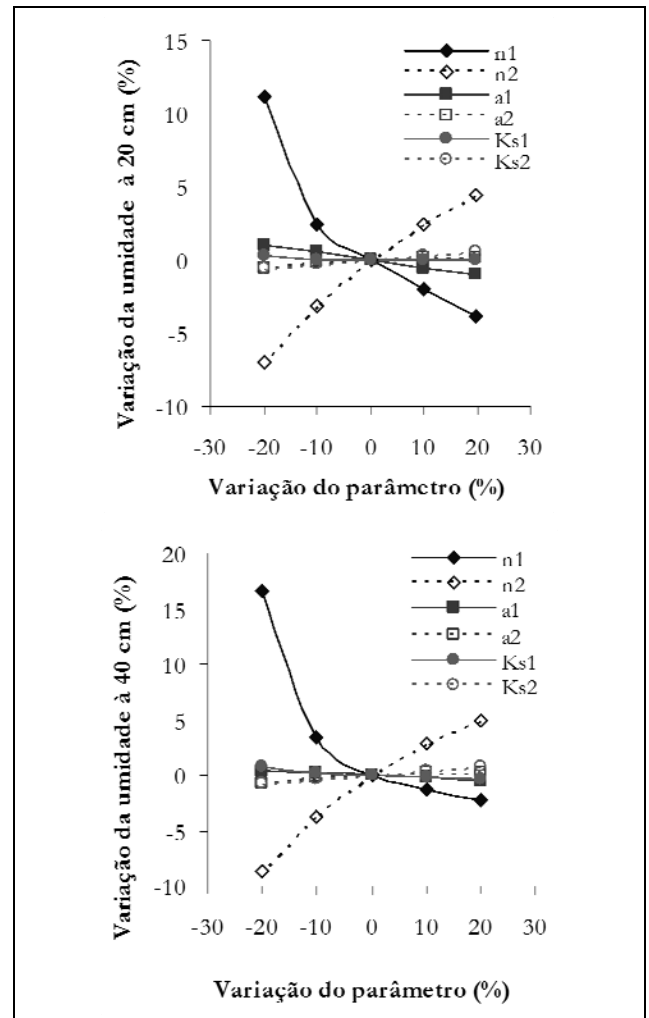


Figura 3 – Variação percentual da umidade volumétrica do solo em função da variação dos parâmetros de entrada ( $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $K_{s1}$ ,  $K_{s2}$ ,  $n_1$  e  $n_2$ ).

Os parâmetros  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $K_{s1}$ ,  $K_{s2}$ , tiveram comportamentos semelhantes quanto a variação de umidade do solo, uma vez que suas curvas estão quase sobrepostas. A variação dos parâmetros  $n_1$  e  $n_2$  pro-

vocaram significativas mudanças na umidade volumétrica do solo, afetando a evaporação do solo, o armazenamento de água no solo e a drenagem na base do perfil.

Os resultados da análise de sensibilidade mostraram que os parâmetros  $n_1$  e  $n_2$  da curva de retenção de água, respectivamente da primeira e segunda camada do solo, foram os que mais influenciaram em todas as saídas analisadas.

Após a análise de sensibilidade, o programa foi calibrado tanto para o solo sem vegetação quanto para o solo vegetado por meio da comparação dos dados simulados no Hydrus1D com os dados medidos experimentalmente, de 15 a 21/03/2002, com solo nu e de 11 a 17/04/2003, com solo vegetado. Os parâmetros das curvas de retenção  $\psi(\theta)$  e de condutividade  $K(\theta)$  de van Genuchten (1980), com a hipótese de Mualem (1976), após a calibração, estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Parâmetros da equação de van Genuchten, com a hipótese de Mualem (1976), após a calibração, para as duas camadas do solo**

Camada	$\theta_s$ ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	$\alpha$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$n$	$K_s$ ( $\text{cm/h}$ )
1 (0-40 cm)	0,459	0,00938	1,369	3,42
2 (40-120cm)	0,440	0,01229	1,327	0,117

### Fase de emergência

Durante a fase de emergência do feijão caupi, ocorreu um total de precipitação pluvial de 88,8 mm distribuídos durante o todo período de simulação. O dia de maior precipitação foi 18/03 (28,0 mm), que ocorreu nas últimas horas do dia. As evoluções da precipitação pluvial e da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D, nas profundidades de 20 e 60 cm, estão apresentadas na Figura 4.

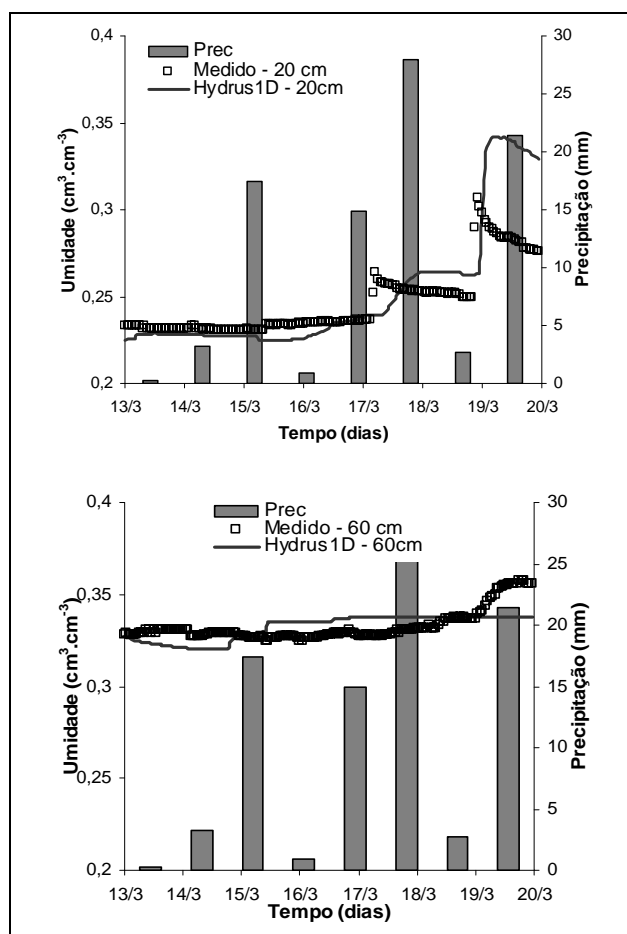
Os valores de umidade volumétrica medidos e simulados pelo Hydrus1D apresentaram boa concordância, apesar da superestimativa feita pelo Hydrus1D no último dia de simulação na profundidade de 20 cm, como mostra a análise estatística apresentada na Tabela 3.

Esta superestimativa concorda com os resultados encontrados por Ndiaye et al. (2007) na simulação da dinâmica da água em solo cultivado com milho, em um intervalo de tempo de 100h, que concluíram que o modelo Hydrus1D simulou de forma satisfatória a evolução da umidade volumétri-

ca em todas as profundidades analisadas, na qual simulações poderiam ser melhoradas através de uma representação mais precisa da estrutura do solo e da variabilidade das propriedades hidráulicas.

**Tabela 3 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de emergência do feijão caupi.**

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
20 cm	9,71	0,83	0,93	0,85
60 cm	3,99	0,82	0,85	0,72



**Figura 4 – Precipitação e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D durante sete dias na fase de emergência da cultura.**

O armazenamento de água no solo e a evapotranspiração da cultura nesta fase fenológica estão apresentados na Figura 5.

A análise estatística apresentada na Tabela 4 mostra que os resultados encontrados para o armazenamento de água no solo foram muito bons e a evapotranspiração simulada pelo Hydrus1D apenas apresentou diferença significativa no dia 13/3/2003, primeiro dia de simulação e primeiro dia após o plantio. Nesta fase fenológica do feijão caupi, a demanda de água é pequena.

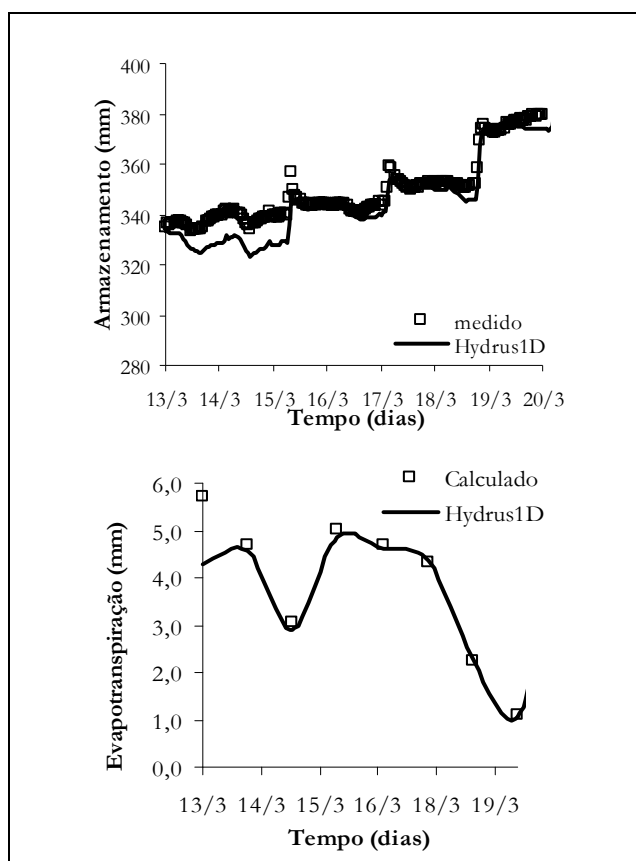


Figura 5 – Armazenamento de água no solo e evapotranspiração na fase de emergência do feijão caupi.

Tabela 4 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração da fase de emergência do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
11/4/03	4,17	0,93	0,89	0,81
14/4/03	11,58	0,69	0,52	0,27
17/4/03	14,92	0,65	0,50	0,26

O solo estava com apenas 2,0% de cobertura vegetal ao final do dia 20/3/2003, mostrando que a

maior perda de água nos estágios iniciais de desenvolvimento da cultura se dá por evaporação direta do solo.

### Fase vegetativa

Na fase vegetativa do feijão caupi (20/3 a 29/4/2003), ocorreu uma precipitação de 164,4 mm. No entanto, foi simulado um intervalo em que não houve precipitação (11 a 17/4/2003). A Figura 6 apresenta os perfis de umidade volumétrica medidos e simulados pelo modelo na fase vegetativa.

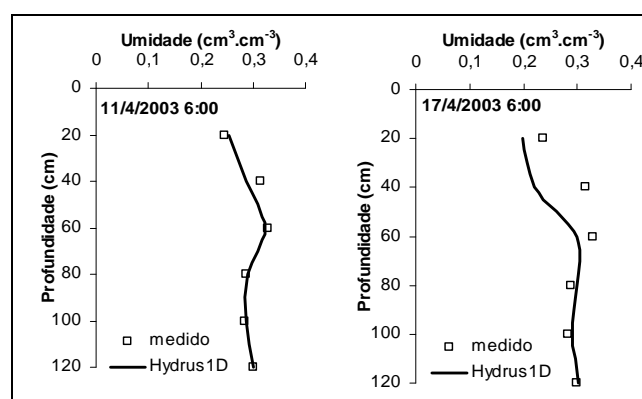


Figura 6 – Perfil de umidade volumétrica medida e simulada do solo nos dias 11 e 17/04/2003.

O perfil de umidade simulado do dia 11/4 apresenta bom resultados como mostra a Tabela 5, pois os valores simulados praticamente concordam com os dados medidos experimentalmente. O perfil simulado do dia 17/4 (que representa o final da simulação para este período) mostra que o solo perdeu umidade principalmente nas camadas de 20 cm e 40 cm. Em geral, os resultados simulados pelo modelo para o perfil de umidade volumétrica foram satisfatórios quando comparado com os dados medidos.

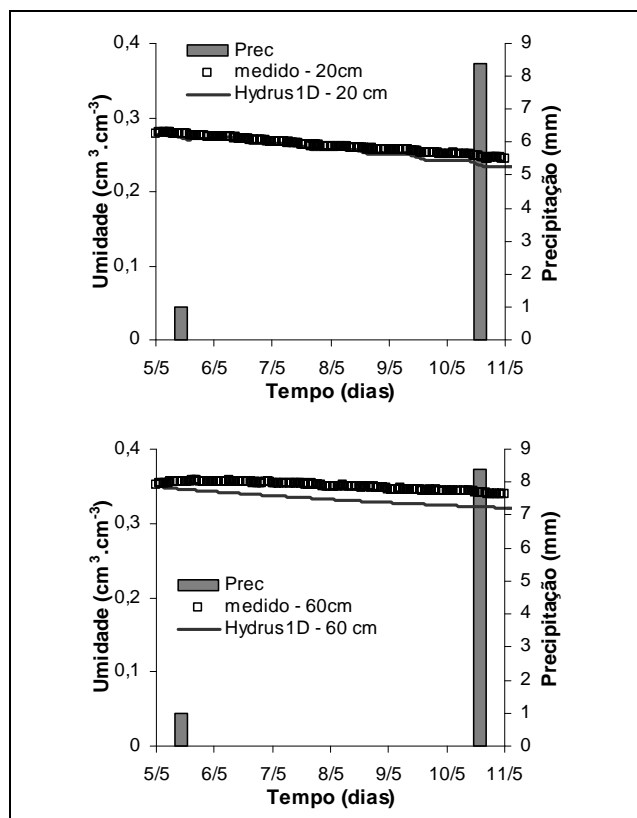
Tabela 5 – Índices estatísticos para o perfil de umidade volumétrica do solo na fase vegetativa do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
Armazenamento	0,80	0,99	0,99	0,98
Evapotranspiração	13,41	0,96	0,95	0,90

### Fase reprodutiva

Nos setes dias de simulação para a fase de reprodução do feijão caupi, a precipitação foi de 9,4

mm. Destes 9,4 mm, ocorreu uma precipitação de 1,0 mm no primeiro dia de simulação e outra de 8,4 mm no último dia de simulação. Nessa fase, o consumo de água pela cultura ainda é elevado, começando a diminuir no final desta fase e início da fase de maturação. Na Figura 7, é apresentada a evolução da umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.



**Figura 7 – Precipitação e umidade volumétrica do solo medida e simulada durante sete dias na fase reprodutiva da cultura.**

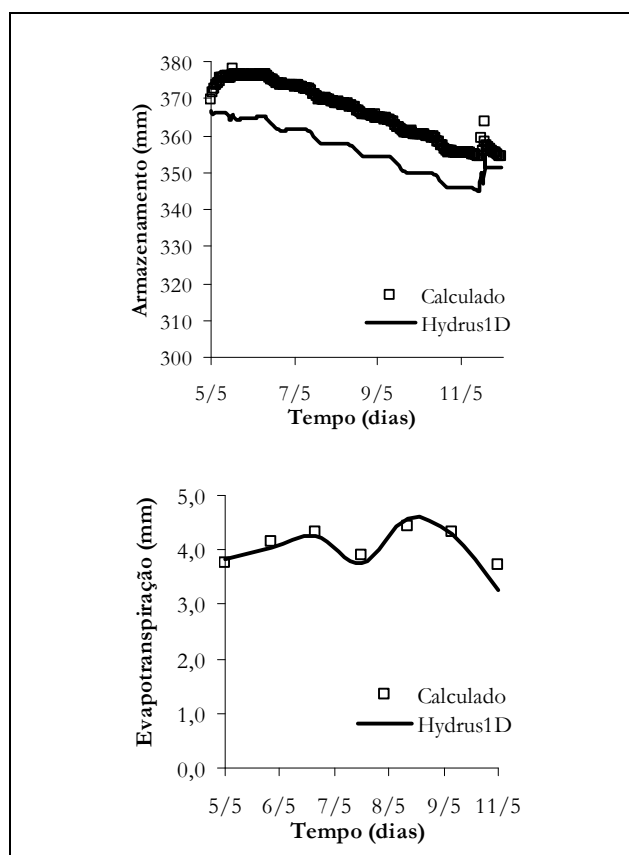
O Hydrus1D simulou de forma satisfatória a evolução da umidade do solo nas duas camadas como mostra a análise estatística da Tabela 6.

**Tabela 6 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase reprodutiva do feijão caupi.**

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
20 cm	2,97	0,90	0,94	0,89
60 cm	6,12	0,45	0,93	0,87

A pequena subestimativa feita pelo modelo na segunda camada do solo provocou a subestimativa

do armazenamento de água no solo, apresentada na Figura 8.



**Figura 8 – Armazenamento de água no solo e evapotranspiração no período de 5 a 11/5/2003.**

A evolução do armazenamento de água no solo e da evapotranspiração simuladas pelo Hydrus1D apresentaram bons resultados, como apresenta os dados estatísticos da Tabela 7.

**Tabela 7 – Índices estatísticos do armazenamento e da evapotranspiração da fase reprodutiva do feijão caupi.**

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
Armazenamento	2,85	0,69	0,96	0,93
Evapotranspiração	4,57	0,92	0,93	0,88

O erro relativo máximo entre os valores medidos e simulados do armazenamento de água no solo foi de 3,35%. Na evapotranspiração, a única divergência ocorreu no dia 11/5, dia de maior precipitação no período, no qual o valor simulado pelo Hydrus1D foi de 3,26 mm e o determinado experimentalmente foi de 3,71 mm.



### Fase de maturação

Na fase de Maturação do feijão caupi não houve precipitação pluviométrica. A evolução da umidade volumétrica neste período está apresentada na Figura 9.

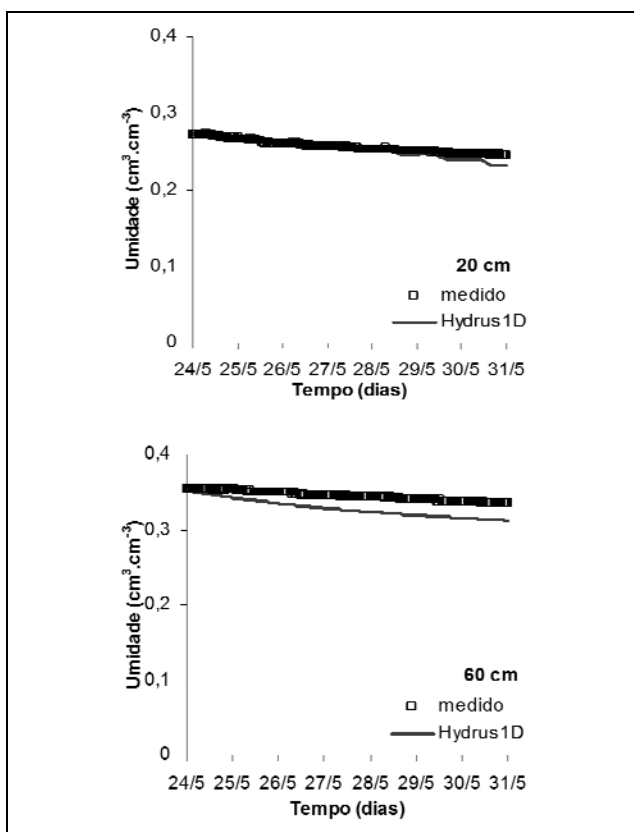


Figura 9 – Evoluções da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo Hydrus1D no período de 24 a 30/5/2003.

Tabela 8 – Índices estatísticos da evolução da umidade volumétrica do solo na fase de maturação do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
20 cm	2,19	0,93	0,97	0,95
60 cm	5,11	0,49	0,98	0,96

O modelo Hydrus1D calculou de forma satisfatória os valores de umidade na profundidade de 20 cm subestimando os valores de umidade na profundidade 60 cm de acordo com os índices estatísticos apresentados na Tabela 8. O armazenamento de

água no solo e a evapotranspiração da cultura estão apresentados na Figura 10.

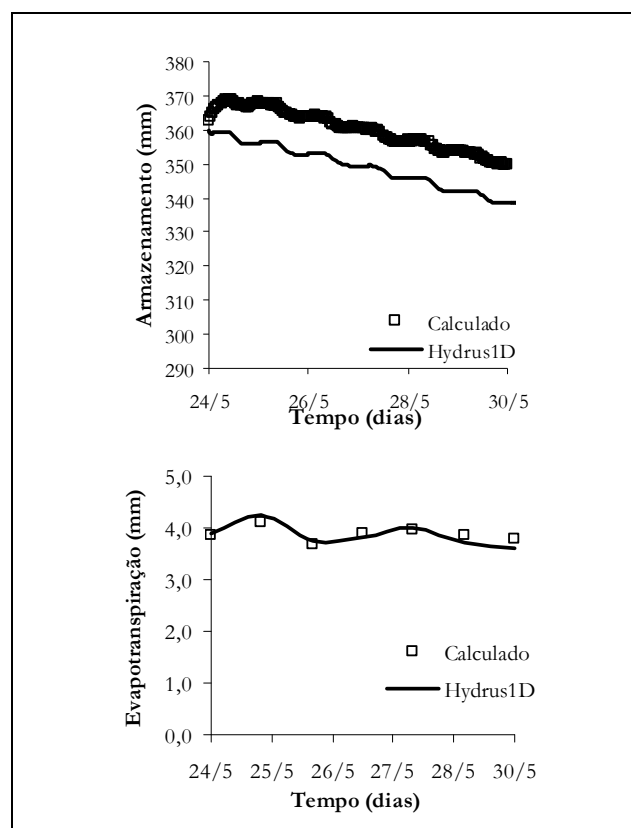


Figura 10 – Armazenamento de água no solo no período de 24 a 30/5/2003.

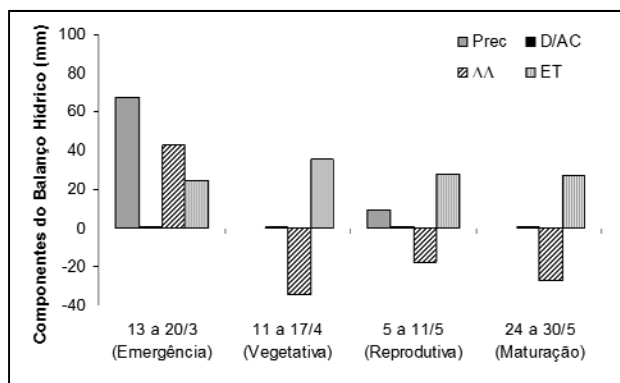
Tabela 9 – Índices estatísticos do armazenamento de água e da evapotranspiração durante a fase de maturação do feijão caupi.

	EQM (%)	d	r	R <sup>2</sup>
Armazenamento	2,77	0,69	0,99	0,98
Evapotranspiração	2,75	0,89	0,87	0,75

A subestimativa feita pelo modelo no armazenamento de água no solo foi devido à pequena subestimativa na umidade volumétrica na profundidade de 40 cm. A Tabela 9 ilustra a análise estatística do armazenamento e da evapotranspiração para esta fase de desenvolvimento da cultura e mostra que houve uma pequena subestimativa do armazenamento de água feita pelo modelo, como ocorreu nas fases vegetativa e reprodutiva. Esta subestimativa concorda com os resultados encontrados por Scanlon et al. (2002), que compararam diversos modelo

numéricos na simulação do comportamento dos componentes do balanço hídrico em regiões semiáridas, e concluíram que os programas Hydrus1D, SoilCover e SWIM, subestimam levemente o armazenamento de água no solo.

Na Figura 11, é apresentado um resumo dos componentes do balanço hídrico simulado pelo Hydrus1D em todo o ciclo do feijão caupi, em que cada subperíodo representa a simulação de sete dias em cada fase fenológica da cultura.



**Figura 11 – Precipitação (P), Fluxo (Drenagem ou Ascensão Capilar), Variação do Armazenamento (ΔA) e Evapotranspiração (ET) dos quatros períodos de simulação do feijão caupi.**

Observa-se que em dois dos quatros períodos de simulação ocorreram precipitação pluviométrica. O período de emergência (13 a 20/3) foi o de maior precipitação (88,8 mm), e o solo teve uma variação de armazenamento de 59,66 mm e evaporação 28,94 mm. No terceiro período de simulação (fase reprodutiva) ocorreu 9,4 mm e a variação do armazenamento foi de -18,03 mm.

Analisando os dois períodos de simulação sem precipitação (de 11 a 17/4 na fase vegetativa e de 24 a 30/5 na fase de maturação), observa-se que na fase vegetativa a evapotranspiração foi de 36,09 mm, que corresponde ao maior valor de ET dos quatros períodos estudados, sendo este, o período de maior demanda de água da cultura, e conseqüentemente o período que mais o solo secou ( $\Delta A = -35,68$  mm), e na fase de maturação, a ET foi de 27,04 mm, que corresponde ao menor valor de ET.

## CONCLUSÕES

Ferramentas computacionais bem ajustadas podem prever períodos mais prováveis de déficit

hídricos para as culturas, auxiliar o agricultor no uso sustentável da irrigação e, portanto, otimizar a produção. Assim, o Hydrus1D simulou de forma satisfatória o perfil de umidade volumétrica do solo e sua evolução temporal, quer seja em períodos sem precipitação pluvial, quer seja em períodos com precipitações elevadas, demonstrando bom desempenho ao simular a evapotranspiração e a variação do armazenamento de água no solo (importantes componentes do balanço hídrico) em condições atmosféricas variadas e de umidade do solo e nas diferentes fases fenológicas do feijão caupi.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES e CNPq pelo suporte.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, G. R.; PEREIRA, S. L.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO, 1998. (FAO irrigation and drainage paper, n. 56).
- ANTONINO, A. C. D. *Simulação numérica do comportamento da água no solo*. 1988. 118 f. (Mestrado) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1988.
- ANTONINO, A. C. D.; HAMMECKER, C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; NETTO, A. M.; ANGULO-JARAMILLO, R.; LIRA, C. A. B. O. Subirrigation of land bordering small reservoirs in the semi-arid region in the Northeast of Brazil: monitoring and Water balance. *Agricultural Water Management*, v. 73, n. 2, p. 131-147, May 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia – SUDENE. *Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado da Paraíba*. Rio de Janeiro, 1972. 670 p. (Boletim técnico, 15).
- FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. *Simulation of Field Water Use and Crop Yield*. New York: John Wiley, 1978.
- FROTA, K. M. G.; SOARES, R. A. M.; ARÊAS, J. A. G. Composição química do feijão caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), cultivar BRS-Milênio. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 28, n. 2, p. 470-476, 2008.

- HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y.; CUENCA, R.; ROSS, P. J.; STEENHUIS, T. S. Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G. (Ed.). *Scale dependence and scale invariance in hydrology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 190-223.
- LIMA, J. R. S. *Balanço hídrico e de energia em solo cultivado e sem vegetação, para as condições do brejo paraibano*. 2004. 167 p. (Doutorado) – Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.
- LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANDRADE, A. P.; SOUZA, C.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Comparação da sonda de nêutrons e de sensores tipo TDR para a determinação dos componentes do balanço hídrico no solo e evapotranspiração do feijão caupi. *Agropecuária Técnica*, Areia, PB, v. 27, n. 1, p. 21-29, 2006a.
- LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. A.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O. Balanço hídrico no solo cultivado com feijão caupi. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 1, n. único, p. 89-95, ou-dez. 2006b.
- MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M. The influence of crop canopy on evapotranspiration and crop coefficient of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Agricultural and Water Management*, v. 49, n. 3, p. 211-224, 2001.
- 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.
- NDIAYE, B.; MOLÉNAT, J.; HALLAIRE, V.; GASCUEL, C.; HAMON, Y. Effects of agricultural practices on hydraulic properties and water movement in soils in Brittany (France). *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 93, n. 2, p. 251-263, 2007.
- RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous media. *Journal of Applied Physics*, v. 1, n. 5, p. 318-333, 1931.
- RITCHIE, J. T. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resources Research*, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, 1972.
- SANTOS, M. A.; CAMARGO, M. B. P. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v. 65, n. 1, p. 173-183, 2006.
- SCANLON, B. R. Review of HYDRUS-1D. *Southwest Hydrology*, Estados Unidos, p. 37, Jul/Aug 2004. Disponível em: <[http://www.swhydro.arizona.edu/archive/V3\\_N4/dept-softwarereview.pdf](http://www.swhydro.arizona.edu/archive/V3_N4/dept-softwarereview.pdf)>. Acesso em: 23 nov. 2011.
- SCANLON, B. R.; CHRISTMAN, M.; REEDY, R. C.; PORRO, I.; SIMUNEK, J.; FLERCHINGER, G. N. Intercode comparisons for simulating water balance of surficial sediments in semiarid regions. *Water Resources Research*, v. 38, n. 12, p. 59.1-16, Dec 2002.
- SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. TH. *The HYDRUS1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. Versão 4.0. Riverside, California: Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, 2008.
- SOARES, W. A. *Estudo e simulação dos fluxos de água e de energia em feijão caupi e mamona cultivados no nordeste do Brasil*. 2009, 139 f. (Doutorado) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- SOUZA, E. S. *Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da Paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente*. 2005. 138 f. (Doutorado) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008.
- van GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, Sept 1980.
- WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, J. J.; FEDDEMA, K. M.; KLINK, D. R. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

### ***Simulation of the Soil Water Dynamics in Cowpea Cultivation Areas in the Brejo Paraibano***

#### **ABSTRACT**

*The cowpea (Vigna unguiculata L. Walp.) is enormously important, socially and economically, for farmers in Northeastern Brazil. Therefore knowledge of the water dynamics in the soil-plant-atmosphere is essential for studies on water use by the crops, optimizing production. There are several experimental techniques to study the dynamics of water, but the high cost, complexity and execution time limits the study of these processes which leads to the use of*

*mathematical modeling of scenarios both in the quest for knowledge and in forecasting results. The aim of this study was to simulate the water dynamics in soil cultivated with cowpea through program Hydrus1D at different phenological stages (emergence, vegetative, reproductive and maturity). Hydrus1D was calibrated with the bare soil and vegetated soil, and then used to simulate the dynamics of water in all phases. Hydrus1D simulated each phase satisfactorily in relation to volumetric soil water content and showed good results in simulations of the evolution of water storage and evapotranspiration, which are important components of water balance.*

**Key-words:** soil moisture, Hydrus1D, evapotranspiration, modeling.