

Simulação dos Fluxos de Água e de Energia na Microbacia Hidrográfica da Represa Vaca Brava no Brejo Paraibano

Willames de Albuquerque Soares¹, Antonio Celso Dantas Antonino², José Romualdo de Sousa Lima³, Eduardo Soares de Souza⁴, Suzana Maria Gico Lima Montenegro⁵, Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira²

willamess@yahoo.com.br; acda@ufpe.br; romualdo@uag.ufpe.br; eduardosouza@uast.ufpe.br; suzanam@ufpe.br

Recebido: 21/12/12 - revisado: 01/02/13 - aceito: 26/08/13

RESUMO

A compreensão e a quantificação das trocas de água e de energia entre os diferentes ecossistemas e a atmosfera são importantes para propósitos meteorológicos, agrônômicos e hidrológicos, sendo que existem diversos modelos para descrever essas trocas. Assim sendo, este trabalho teve como objetivo simular os fluxos de água e de energia, por meio do modelo SiSPAT (Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model), na microbacia hidrográfica da represa Vaca Brava, Areia-PB. Os dados foram obtidos de uma área de 04 ha (6°58'S, 35°41'O e 620 m), instrumentada com uma estação micrometeorológica automática, que permitia a estimativa dos componentes do balanço de energia, pelo método da razão de Bowen, e da evaporação do solo. Também foram instalados sensores para a determinação de perfis de temperatura e umidade volumétrica do solo. Dos resultados, observou-se que o SiSPAT demonstrou excelente desempenho ao simular os componentes do balanço de energia e a evaporação, nas mais variadas condições atmosféricas e de umidade do solo. O SiSPAT também simulou adequadamente os perfis de umidade volumétrica e de temperatura do solo, bem como sua evolução temporal, quer seja em períodos sem precipitação pluvial, quer seja em períodos com precipitações elevadas.

Palavras-Chave: SiSPAT. Umidade volumétrica do solo. Evaporação.

INTRODUÇÃO

A conservação dos recursos hídricos está intimamente ligada à conservação de nascentes, de matas ciliares, uso adequado do solo e manutenção de cobertura vegetal. Esses fatores são regulamentados por leis, tais como o Código Florestal e a Política Nacional de Recursos Hídricos, para assegurar que as atividades antropogênicas alterem o mínimo possível a dinâmica e o ecossistema das bacias. Dessa maneira, há necessidade de se conhecer o potencial hídrico das bacias e os efeitos negativos que as atividades antropogênicas acarretam ao ambiente. Sendo assim, vale ressaltar que a estimativa de parâmetros em nível de bacias hidrográficas é de fundamental importância na gestão dos recursos hídricos bem como para programas de recuperação ambiental (BATISTA, 2011).

Dos componentes do ciclo hidrológico, a evapotranspiração é um dos mais importantes, uma vez que representa a saída de água por meio dos processos de evaporação do solo e transpiração vegetal. De acordo com Barreto, Wendland e Marcuzzo (2009) em algumas regiões, a quantidade de água evapotranspirada de uma bacia hidrográfica representa parcela superior à água que escoar superficialmente.

As mudanças climáticas têm potencial de alterar os processos do ciclo hidrológico, tais como precipitação que afeta o escoamento superficial, temperatura e umidade relativa que possuem estreita relação com evaporação e vazão em corpos hídricos e evapotranspiração das plantas (GONDIM et al., 2011).

De acordo com Marengo et al. (2011), aumentos de temperatura associados à mudança de clima decorrente do aquecimento global, independente do que possa vir a ocorrer com as chuvas, já seriam suficientes para causar maior evaporação aos lagos, açudes, reservatórios e aumento da evapotranspiração.

A evapotranspiração é um processo importante que é controlado pela interação de um grande número de fatores bióticos e ambientais. Os parâme-

¹ - Escola Politécnica/UPE

² - Departamento de Engenharia Nuclear/UFPE

³ - Unidade Acadêmica de Garanhuns/UFRPE

⁴ - Unidade Acadêmica de Serra Talhada/UFRPE

⁵ - Departamento de Engenharia Civil/UFPE

tos e processos do ecossistema, tais como, umidade do solo, produtividade vegetal, balanços de água e de nutrientes são todos influenciados pela evapotranspiração; por outro lado, todos esses processos influenciam a evapotranspiração. Além disso, a partição da energia disponível nos fluxos de calor latente e calor sensível também afeta vários aspectos do tempo e do clima (HAO et al., 2007).

Desse modo, a compreensão e a quantificação desses fluxos são importantes para propósitos meteorológicos, agrônômicos e hidrológicos. Os processos biofísicos envolvidos nessas trocas são numerosos e complexos, dificultando sua medição direta em grandes áreas, de forma contínua e num grande intervalo de tempo, devido ao grande número de equipamentos e recursos envolvidos. Assim sendo, foram concebidos modelos que descrevem essas trocas de massa e de calor no sistema solo-vegetação-atmosfera, os chamados modelos SVATs (SOARES, 2009).

Dentre esses modelos, o SiSPAT (Simple Soil Plant Atmosphere Transfer Model), destaca-se por seu grande detalhamento físico em todas as partes do sistema solo-planta-atmosfera. Desde sua primeira apresentação na literatura (BRAUD et al., 1995), o SiSPAT vem sendo continuamente validado em diferentes tipos de vegetação, de solos e sujeito à diferentes condições climáticas e ambientais (VARADO; BRAUD; ROSS, 2006; BOULET et al., 2007; MORET; BRAUD; ARRÚE, 2007; BOULET; MOUGENOT; ABDELOUAHAB, 2009; SOARES 2009). Entretanto, mesmo com uma vasta quantidade de modelos existentes (EASTON et al., 2008; IMMERZEEL; DROOGERS, 2008; RIM, 2008; CAMMALLERI et al., 2010; STRICEVIC et al., 2011), poucos desses modelos SVATs, incluindo o SiSPAT, foram avaliados nas condições edafoclimáticas do nordeste brasileiro.

Em face ao exposto, o presente trabalho teve como objetivo simular os fluxos de água e de energia, por meio do modelo SiSPAT, na microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia-PB.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização, clima e solo da área experimental

Os dados necessários para a aplicação do modelo SiSPAT foram obtidos numa área de 4,0 ha localizada na fazenda Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, situado na microrregião do Brejo Paraibano, no município de Areia-PB (6°58'12" S e

35°42'15" O). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo (OLIVEIRA et al., 2009).

Essa área está inserida na microbacia hidrográfica da represa Vaca Brava. Essa microbacia ocupa uma área de 1.500 ha, com altitude média de 637 m e temperatura média anual de 24°C, apresentando pequena amplitude de variação. A maior porção da bacia localiza-se quase que inteiramente no Município de Areia e apresenta clima tropical chuvoso (pluviosidade anual de 1.200 mm) com chuvas de outono-inverno e déficit hídrico de setembro a janeiro, com relevo ondulado a fortemente ondulado (SANTOS; SALCEDO, 2010).

Descrição do modelo SiSPAT

O modelo SiSPAT descreve as trocas verticais de energia e água no sistema solo-planta-atmosfera (Figura 1).

Basicamente, o SiSPAT é um modelo unidimensional (vertical), forçado com séries climáticas de temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, radiação global e atmosférica, e precipitação pluvial. O modelo é dividido esquematicamente em quatro módulos: o módulo solo, o módulo atmosfera, o módulo interface solo-planta-atmosfera e o módulo solo-planta (BRAUD et al., 1995). O SiSPAT é um código computacional, escrito na linguagem Fortran, sendo que a descrição detalhada de todos os processos de transferência de água e de energia, com suas equações resultantes, pode ser encontrada detalhadamente em Soares (2009). Nesta pesquisa foi usada a versão do SiSPAT para solo sem vegetação, usando-se apenas os módulos solo e atmosfera.

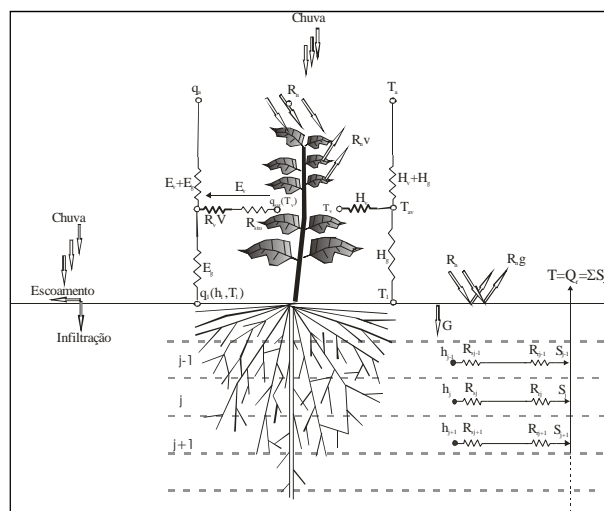


Figura 1 - Esquema ilustrativo das principais características do modelo SiSPAT

O acoplamento entre solo e atmosfera foi realizado por um sistema de duas equações não lineares, a equação do balanço de energia na superfície do solo e a equação de continuidade do fluxo de massa através da superfície do solo, equações 1 e 2 respectivamente, tendo como incógnitas o potencial matricial, h , e a temperatura na superfície do solo, T .

$$C_h \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D_{mh} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - K) - \frac{S}{\rho_w} \quad (1)$$

$$C_T \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} (D_{ch} \frac{\partial h}{\partial z} + D_{cT} \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (2)$$

sendo S a extração de água pelo sistema radicular da cultura, C_h a capacidade capilar, ($C_h = \partial \theta / \partial h$), C_T a capacidade térmica volumétrica ($J m^{-3} K^{-1}$), D_{mh} a condutividade hidráulica isotérmica ($m s^{-1}$), D_{mT} a difusividade térmica de vapor ($m^2 s^{-1} K^{-1}$), D_{ch} a condutividade isotérmica de vapor ($W m^{-2}$), D_{cT} a condutividade térmica aparente ($W m^{-1} K^{-1}$), K a condutividade hidráulica do solo ($m s^{-1}$). Todos esses parâmetros são funções da umidade volumétrica (ou do potencial matricial), e/ou da temperatura do solo.

Os perfis de temperatura e de potencial matricial são utilizados como condição inicial. Para a condição de fronteira inferior foram usadas a temperatura e o potencial matricial da água no solo na base do perfil (0,80 m), enquanto que para a condição de fronteira superior ela é imposta pela resolução do módulo interface solo-atmosfera.

No módulo interface solo-atmosfera, o sistema de duas equações não lineares é resolvido usando o método de Newton-Raphson. Deve-se observar que quando o sistema de equações da interface é resolvido, é necessário conhecer o potencial matricial h_2 e a temperatura do solo T_2 no segundo nó. Como o módulo solo ainda não foi resolvido, estes valores são extrapolados a partir de seus valores nos dois passos de tempos anteriores. Quando o módulo solo é resolvido, a convergência entre os valores extrapolados e os valores atuais é verificada. Se a diferença estiver acima de um limite estabelecido, o módulo interface é novamente calculado com os novos valores de h_2 e T_2 e o procedimento é repetido até que a convergência de todos os módulos seja alcançada.

No módulo atmosfera, um procedimento iterativo é usado para estimar o comprimento de Monin-Obukhov (SOARES, 2009).

Aplicação do modelo SiSPAT

A camada de solo entre a superfície e 0,40 m de profundidade apresenta classificação textural Franco Argilo Arenosa e a camada de solo entre 0,40 e 0,80 m é classificada como Argilo Arenosa (LIMA et al., 2011). Por esse motivo, na simulação dos fluxos de água e de energia o solo foi dividido em duas camadas: 0-0,40 e 0,40-0,80 m, discretizadas espacialmente em subcamadas de 0,01 m.

Inicialmente foram calibrados manualmente os parâmetros hidrodinâmicos do solo, relativos às curvas de retenção (n , parâmetro de forma e hg , pressão de borbullamento) e de condutividade hidráulica do solo (η , parâmetro de forma e Ks , condutividade hidráulica saturada), devido os mesmos terem efeito direto nas trocas de água e de energia do solo. Foram utilizados dados de um período correspondente a 07 dias (15/03 a 21/03/2002), diferente do período de validação do modelo.

Para a primeira camada de solo (0-0,40 m) foram utilizados os valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos por Souza et al. (2008a), os quais trabalharam na mesma área e com o mesmo solo desta pesquisa. Já para a segunda camada (0,40-0,80 m), foram realizados ensaios de infiltração, de acordo com a metodologia “Beerkan”, descrita em Souza et al. (2008b).

Na tabela 1 estão apresentados os valores iniciais e calibrados do parâmetro “ n ” e da pressão de borbullamento (hg), para a curva de retenção proposta por van Genuchten (1980) e o parâmetro η e a condutividade hidráulica saturada do solo (Ks), para a curva de condutividade hidráulica proposta por Brooks e Corey (1964).

Tabela 1 - Valores calibrados dos parâmetros hidrodinâmicos de um Latossolo Amarelo sem cultivo em Areia-PB

Parâmetros	Valor inicial	Valor calibrado	Valor inicial	Valor calibrado
	Camada 0-0,40 m		Camada 0,40-0,80 m	
n	2,21	2,18	2,39	2,89
hg (m)	-0,028	-0,030	-0,547	-0,425
η	12,57	11,23	8,56	15,57
Ks ($m s^{-1}$)	13,5 e-6	9,5 e-6	11,85 e-7	3,25 e-7

Após se calibrar os parâmetros hidrodinâmicos do solo, o modelo foi executado e fez-se uma comparação entre os valores medidos e simulados dos componentes do balanço de energia (Tabela 2). Observou-se que todos os componentes do balanço de energia foram simulados de forma adequada,

com elevado índice d, baixa RMSE (erro quadrático), com correlações “quase perfeita” e índices “c” classificados como ótimos. Esses índices estatísticos (d, RMSE e c) são definidos na seção desempenho do modelo (nas equações 7 e 8 e na Tabela 3). Desse modo, para o período de validação foram usados os valores calibrados dos parâmetros hidrodinâmicos do solo.

Tabela 2 - Índices estatísticos da calibração do modelo SiSPAT para os componentes do balanço de energia

	Índice d	RMSE ¹	r	Índice c	Desempenho
Rn	0,989	58,5	0,993	0,983	Ótimo
LE	0,960	60,5	0,933	0,896	Ótimo
G	0,954	37,6	0,927	0,885	Ótimo
H	0,936	41,5	0,961	0,899	Ótimo

1. RMSE em $W m^{-2}$

As simulações foram realizadas com duração de 07 dias correspondendo ao período de 14 a 20/03/2003. Os dados de entrada utilizados no modelo foram dados atmosféricos, perfis de temperatura e de potencial matricial do solo, a capacidade térmica volumétrica do solo e os parâmetros físico-hídricos típicos do solo, tais como a curva de retenção de água no solo $h(\theta)$ e a condutividade hidráulica $K(\theta)$.

Dados atmosféricos

Os dados atmosféricos de entrada consistem de: radiação solar global (RG, $W m^{-2}$); radiação atmosférica (RA, $W m^{-2}$); temperatura do ar (T, K); umidade específica (q, $kg kg^{-1}$); velocidade do vento (U, $m s^{-1}$) e precipitação pluvial (mm). Os valores de T, de U, de RG e de precipitação pluvial foram obtidos de um termohigrógrafo, de um anemômetro (numa altura de 1,05 m), de um piranômetro e de um pluviógrafo (numa altura de 2,0 m), respectivamente, instalados numa estação micrometeorológica automática localizada no centro da área.

O valor de RA foi obtido em função de T pela equação:

$$RA = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)^4 \quad (3)$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzman ($5.67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) e ε a emissividade da atmosfera, que foi obtida a partir da expressão de Brutsaert (1975).

Características hidrodinâmicas e térmicas do solo

A umidade volumétrica do solo foi monitorada numa trincheira por meio de 09 sensores acoplados a um TDR, modelo CS615 (Campbell Scientific Inc). Os sensores foram instalados nas profundidades de 0,10; 0,20; 0,30; 0,40; 0,50; 0,60; 0,80; 1,00 e 1,20 m.

Os dados de temperatura do solo foram obtidos por intermédio de sensores de temperatura, modelo 108 (Campbell Scientific) instalados nas profundidades de 0,02, 0,08, 0,14, 0,20, 0,40, 0,60, 0,80 e 1,00 m. Todos esses sensores (de umidade e temperatura do solo) foram conectados a um datalogger, CR 10X, (Campbell Scientific Inc.), sendo as medidas realizadas a cada 60 segundos, com a média armazenadas de 30 leituras, ou seja, de meia em meia hora.

As características térmicas, isto é, a capacidade e a condutividade térmica, foram obtidas dos modelos de Vries (1966). Já a difusividade térmica foi obtida pelo método harmônico (HORTON; WIERENGA; NIELSEN., 1983). Os perfis de temperatura do solo e de potencial matricial da água no solo, obtidos pelos valores de umidade volumétrica do solo, são utilizados como condição de fronteira inferior, bem como para as condições iniciais para as simulações com o modelo SiSPAT.

Para a medida do fluxo de calor no solo (G), foram instalados fluxímetros em dois locais, numa profundidade $z_1 = 0,05$ m, juntamente com um sensor de umidade do solo na mesma profundidade, além de duas sondas térmicas instaladas horizontalmente nas profundidades de $z_1 = 0,02$ e $z_2 = 0,08$ m.

As curvas de retenção, $\theta(h)$, e de condutividade hidráulica, $K(\theta)$, foram descritas, respectivamente, pelos modelos de Brooks e Corey (1964) e de van Genuchten (1980):

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-\left(1 - \frac{2}{n}\right)} \quad (4)$$

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (5)$$

sendo θ a umidade volumétrica, θ_r e θ_s as umidades volumétricas residual e saturada, respectivamente; h o potencial matricial, h_g a pressão de borbulhamento, a partir da qual a água começa a drenar do solo; n um parâmetros de forma; K_s a condutividade hi-

dráulica saturada do solo e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Determinação do balanço de energia e evaporação do solo

Para a realização do balanço de energia foram instalados, na mesma estação micrometeorológica automática citada anteriormente, três sensores de medidas da temperatura e da umidade relativa do ar, e da velocidade do vento, em três níveis ($z_1 = 0,35$ m, $z_2 = 0,70$ m e $z_3 = 1,05$ m) acima do solo.

O balanço de energia na superfície do solo pode ser escrito por meio da seguinte equação (LIMA et al., 2011):

$$Rn = G + H + LE \quad (6)$$

onde Rn é o saldo de radiação ($W m^{-2}$), G o fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$), H o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$) e LE o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$).

A partição da energia disponível ($Rn-G$) entre fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) foi obtida pelo método do balanço de energia, baseado na razão de Bowen, de acordo com a metodologia descrita em Lima et al. (2011).

A taxa de evaporação da água do solo (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização (L), considerado como constante ($2,45 MJ kg^{-1}$). Esse valor constante se refere a uma temperatura de $20^\circ C$, embora L seja uma função fraca da temperatura (LIMA et al., 2011).

Desempenho do modelo

A comparação entre os valores medidos experimentalmente e simulados pelo modelo SiSPAT foi verificada pelo coeficiente de correlação (r), pelo índice de concordância (d) dado pela equação (7), pelo índice de confiança ou desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), obtido do produto entre r e d , além do erro quadrático (RMSE), dado pela equação (8).

$$d = 1 - \frac{\sum (E_i - M_i)^2}{\sum ((E_i - M) + (M_i - M))^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum (E_i - M_i)^2}{N} \right\}^{1/2} \quad (8)$$

sendo E_i os valores simulados pelo modelo SiSPAT, M_i os valores medidos, M a média dos valores medidos e N o número de observações.

A faixa de valores do índice “ d ” varia entre 0 (zero) para nenhuma concordância a 1 (um) para uma concordância perfeita. O índice “ c ” tem a finalidade de avaliar o desempenho do modelo utilizado, considerando as seguintes classes de interpretação (Tabela 3), de acordo com Camargo e Sentelhas (1997).

Tabela 3 - Classificação para o índice de confiança “ c ”

Desempenho	Valor de c
Ótimo	$> 0,85$
Muito bom	$0,76-0,85$
Bom	$0,66-0,75$
Mediano	$0,61-0,65$
Sufrível	$0,51-0,60$
Mau	$0,41-0,50$
Péssimo	$< 0,40$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Validação do modelo

A evolução da umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT nas profundidades de 0,05 e de 0,20 m, juntamente com a precipitação pluvial, durante o período de 14 a 20/03/2003 é apresentada na figura 2.

Observa-se para a profundidade de 0,05 m (Figura 2a) que, apesar dos valores absolutos serem diferentes, o modelo SiSPAT simulou muito bem a evolução da umidade volumétrica do solo, uma vez que a variação de umidade volumétrica do solo em função da precipitação pluvial tanto foi observada nos valores medidos quanto nos valores simulados. Observa-se, ainda, que os valores de umidade volumétrica do solo simulados pelo SiSPAT foram superiores aos valores medidos.

Para a profundidade de 0,20 m (Figura 2b) o SiSPAT subestimou a umidade volumétrica do solo; no entanto, do mesmo modo que na profundidade anterior, a variação da umidade em função da entrada de água no solo foi simulada de forma adequada. A subestimativa da umidade a 0,20 m foi uma consequência direta da superestimativa a 0,05 m. Este comportamento indica que o comportamento hidrodinâmico do solo difere nas duas profundidades. Braud et al. (1995) encontraram resultados semelhantes ao dessa pesquisa. Já Moret, Braud e Arrúe

(2007) utilizaram o modelo SiSPAT numa área semi-árida da Espanha para simular o balanço hídrico em solo submetido ao cultivo convencional e ao plantio direto e encontraram que a evolução da umidade volumétrica do solo foi simulada de forma adequada pelo modelo SiSPAT, tanto para o cultivo convencional quanto para o plantio direto.

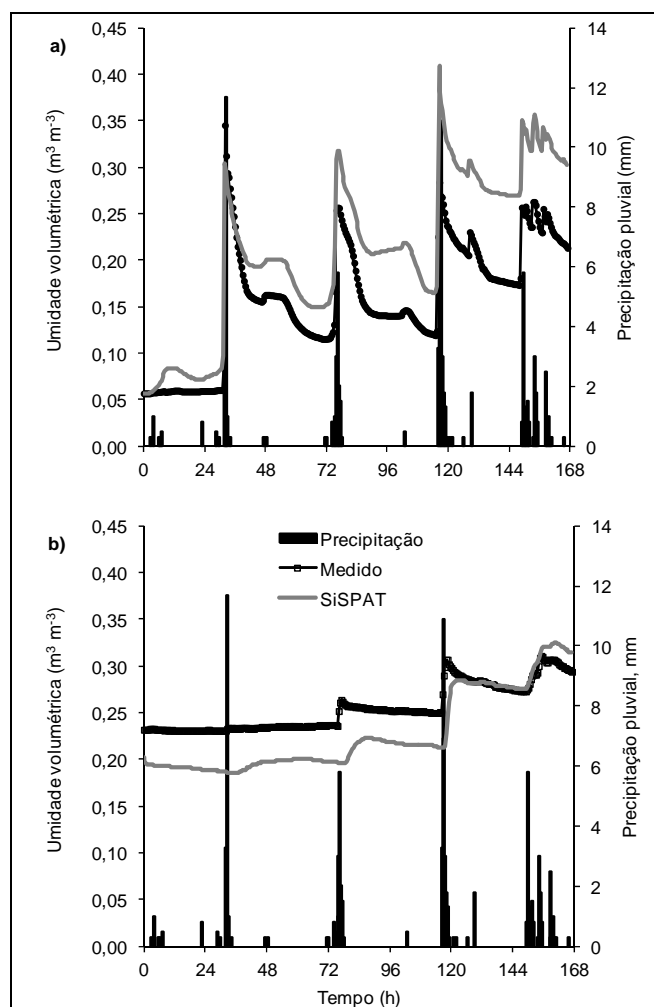


Figura 2 - Precipitação pluvial e umidade volumétrica do solo medida e simulada pelo SiSPAT durante o período de 14 a 20/03/2003 em Areia-PB, a) 0,05 m e b) 0,20m de profundidade

Essas discrepâncias entre os valores absolutos simulados e medidos podem ser consideradas de pouca importância, uma vez que os próprios dados medidos podem apresentar imprecisões, devido ao próprio erro do sensor de umidade do solo utilizado, o qual é de 2%. Além disso, ainda existe o problema da variabilidade espacial da umidade volumétrica do

solo, que apresenta grandes diferenças de valores em pontos próximos. Souza et al. (2008a) realizaram um estudo de variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, na mesma área experimental desta pesquisa, e encontraram que a umidade volumétrica apresentou elevada variabilidade espacial.

Com relação aos índices estatísticos utilizados para comparar a umidade volumétrica medida e simulada (Tabela 4), observa-se que a umidade volumétrica simulada obteve desempenho bom e muito bom, com correlações quase perfeitas, considerando-se o índice “c” e o coeficiente de correlação, respectivamente. Já em relação ao índice “d”, observou-se exatidão moderada, expressa pelo valor do índice “d” acima de 0,73.

Tabela 4 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a umidade volumétrica do solo (θ)

	Índice d	RMSE ¹	r	Índice c	Desempenho
0,05 m	0,8477	0,062	0,9566	0,8101	Muito bom
0,20 m	0,7371	0,038	0,9472	0,6982	Bom

1. RMSE em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$

O erro quadrático (RMSE) apresentou valores de 0,062 e 0,038 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para as profundidades de 0,05 e 0,20 m, respectivamente, indicando pequeno erro dos valores simulados pelo SiSPAT.

A figura 3 apresenta perfis de umidade volumétrica do solo em dois dias com condições diferenciadas de umidade volumétrica. Observa-se para o dia 15/03/2003 que a umidade volumétrica do solo medida, às 09:00 h, a 0,05 m de profundidade (0,294 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) é maior do que a 0,20 m (0,234 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Esse valor mais elevado na superfície foi devido aos 15,0 mm de precipitação pluvial, que ocorreram no período das 07:30 às 8:30 h, como pode ser visualizado na figura 1. Esse comportamento também foi observado nos dados simulados, sendo que a umidade volumétrica simulada a 0,05 m foi 0,279 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e a simulada a 0,20 m foi 0,186 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Para as demais profundidades os valores medidos e simulados praticamente se sobrepuseram.

O perfil de umidade volumétrica do solo medido no dia 16/03/2003 às 15:00 h, caracteriza-se por apresentar valores menores a 0,05 m, quando comparado com a profundidade de 0,20 m, ou seja, comportamento inverso ao do dia 15/03/2003. Mas, os valores medidos e simulados apresentaram o mesmo comportamento.

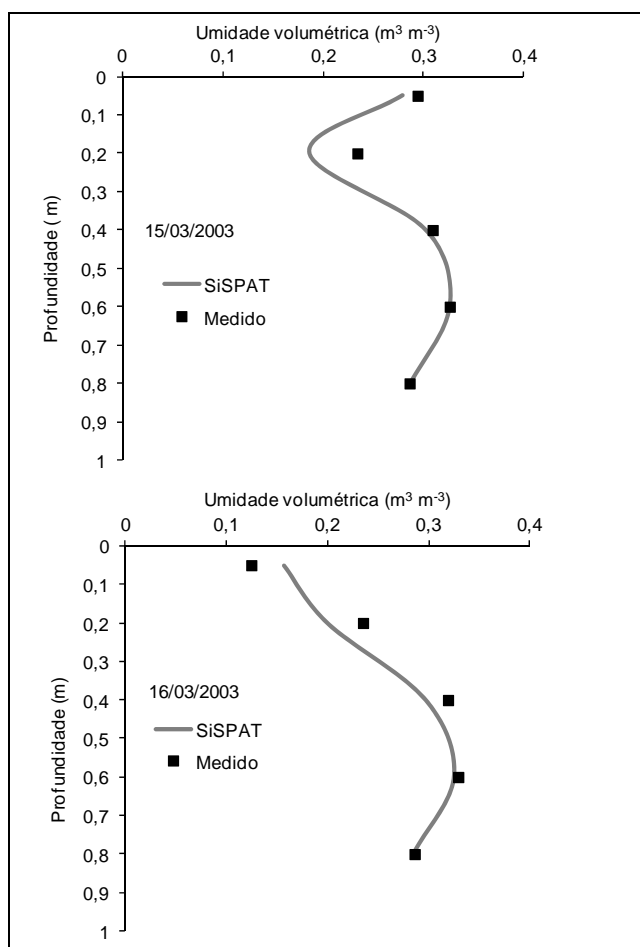


Figura 3 - Perfil de umidade volumétrica do solo medido e simulado nos dias 15 e 16/03/2003 em Areia-PB, nas profundidades de 0,05; 0,20; 0,40; 0,60 e 0,80 m

Braud et al. (1997) utilizaram o modelo SiSPAT para um período de 54 dias numa área do projeto HAPEX-Sahel. Esse período de estudo foi caracterizado por ter dias com precipitação intensa e vários dias sem precipitação, portanto, o solo estava num momento com umidade elevada e noutro com umidade muito baixa. Os resultados demonstraram que o modelo SiSPAT foi capaz de simular os perfis de umidade volumétrica do solo de forma muito boa, tanto para o período úmido quanto para o período de secamento do solo.

A figura 4 mostra a comparação da temperatura do solo nas profundidades de 0,02; 0,08; 0,14 e 0,20 m, medida e simulada pelo SiSPAT.

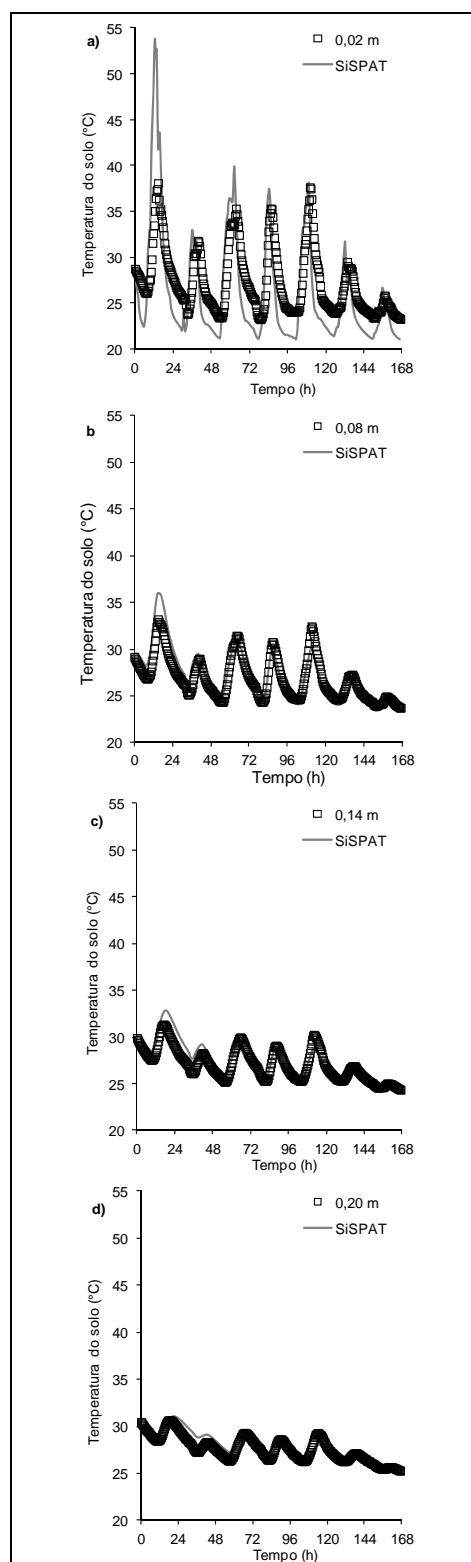


Figura 4 - Temperatura do solo medida e simulada nas profundidades de a) 0,02 m; b) 0,08 m; c) 0,14 m e d) 0,20 m, durante o período de 14 a 20/03/2003 em Areia-PB

Observa-se, de uma forma geral, que o SiSPAT simulou muito bem os valores de temperatura do solo, principalmente para as camadas mais profundas. Em alguns dias, sobretudo para a profundidade de 0,02 m, os valores simulados superestimaram os medidos. Para as outras profundidades, essa superestimativa ocorreu praticamente durante o valor de pico do primeiro dia.

A tabela 5 apresenta a estatística comparando os valores modelados e medidos, a cada 30 minutos, da temperatura do solo para as profundidades de 0,02; 0,08; 0,14 e 0,20 m. Vê-se que a temperatura do solo foi simulada de forma adequada para todas as profundidades, no entanto, nas profundidades de 0,08 e 0,14 m a simulação foi mais adequada, tendo em vista o ótimo desempenho do modelo (índice “c” superiores a 0,85).

Tabela 5 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a temperatura do solo

	Índice d	RMSE ¹	r	Índice c	Desempenho
0,02 m	0,853	3,7	0,868	0,741	Bom
0,08 m	0,948	1,1	0,925	0,877	Ótimo
0,14 m	0,941	0,9	0,923	0,869	Ótimo
0,20 m	0,933	0,7	0,896	0,836	Muito Bom

1. RMSE em °C

Braud et al. (1995), utilizando o modelo SiSPAT na cultura da soja, encontraram subestimativas na temperatura do solo, sendo as diferenças de temperatura da ordem de 1°C. Segundo esses autores, essa subestimativa pode ser explicada devido ao fato do modelo SiSPAT ter sido aplicado considerando o solo homogêneo quanto as suas propriedades térmicas. Nesta pesquisa também foi utilizada essa hipótese.

A figura 5 mostra a evolução temporal do saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor no solo (G), latente (LE) e sensível (H), medidos e simulados pelo SiSPAT, no período de validação do modelo. De forma geral, o modelo apresentou uma boa simulação para o Rn. As maiores diferenças ocorreram nos horários onde o Rn apresentava seus valores mais elevados, ao redor das 12 h, com o SiSPAT superestimando os valores medidos. Exceção feita nos dois últimos dias, onde os valores máximos do Rn foram subestimados.

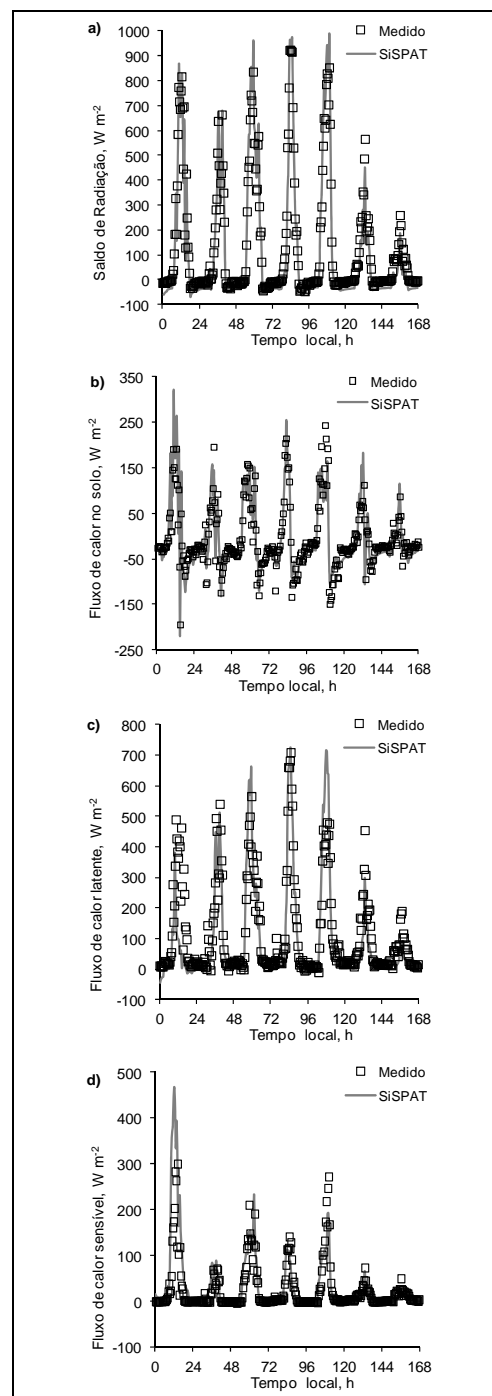


Figura 5 - Evolução diária do: a) saldo de radiação (Rn) e dos fluxos de calor na superfície do solo b) (G), c) latente (LE) e d) sensível (H), medidos e simulados durante o período de 14 a 20/03/2003 em Areia-PB

Durante a noite o Rn simulado foi sempre menor que o medido. Esse comportamento pode ser explicado devido à deposição de orvalho nas cupelas

do saldo radiômetro. Stewart (1978) citado em Braud et al. (1995) encontraram que esse fenômeno diminuiu o valor absoluto do Rn. Observa-se, ainda, que o Rn medido à noite apresentou valores variáveis. No entanto, os valores simulados foram quase constantes. Essa variação do Rn à noite está relacionada com a presença de nuvens; se o céu está sem nuvens, o que não foi o caso, geralmente, o Rn fica quase constante. Tendo em vista o SiSPAT utilizar a radiação atmosférica (RA), como dado de entrada, para simular o Rn, e a equação usada para estimar a RA ser válida apenas para condições de céu sem nuvens, o Rn simulado fica com valores quase constantes à noite.

O modelo apresentou uma boa simulação para o G e as maiores diferenças ocorreram nos horários de pico, onde os valores simulados diferem daqueles medidos em alguns dias. O bom desempenho do SiSPAT já era esperado, tendo em vista o modelo ter simulado de forma adequada a temperatura do solo.

Observa-se, de modo geral, que a concordância entre os valores medidos e simulados do LE foi boa, entretanto houve certa discrepância, principalmente para o primeiro e nos dois últimos dias, onde o LE simulado foi muito inferior ao medido. Do mesmo modo que ocorreu para o LE, houve uma razoável concordância entre os valores medidos e simulados do H, principalmente para o primeiro e quinto dias de simulação.

A tabela 6 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados pelo SiSPAT do Rn, G, H e LE.

Tabela 6 - Índices estatísticos da validação do modelo SiSPAT, para o saldo de radiação (Rn) e para os fluxos de calor latente (LE), sensível (H) e no solo (G)

	Índice	RMSE ¹	r	Índice	Desempenho
	d			c	
Rn	0,9913	47,3	0,9903	0,9817	Ótimo
LE	0,9415	76,6	0,8991	0,8466	Muito bom
H	0,8990	38,6	0,8677	0,7801	Muito bom
G	0,9049	43,9	0,8261	0,7475	Bom

1. RMSE em $W m^{-2}$

Quanto ao Rn, vê-se que os valores simulados apresentaram um ótimo desempenho (índice “c” acima de 0,85), uma correlação quase perfeita (coeficiente de correlação acima de 0,9), um baixo RMSE (valores abaixo de $48 W m^{-2}$) e exatidão elevada (índice “d” acima de 0,99), indicando que o SiS-

PAT simulou de forma excelente o saldo de radiação.

Resultados semelhantes ao dessa pesquisa foram obtidos por vários autores ao utilizarem o SiSPAT para simular o saldo de radiação (BRAUD et al., 1995; BOULET et al., 2007).

Quanto ao LE, H e G, observa-se que o SiSPAT apresentou um desempenho de muito bom a bom, uma correlação muito alta, um razoável RMSE e uma exatidão elevada, indicando que o SiSPAT simulou de forma muito boa estes fluxos.

A evaporação do solo acumulada durante o período de 14 a 20/03/2003, medida e simulada, é apresentada na figura 6. A tabela 7 apresenta a estatística entre os valores medidos e simulados.

Ao final da simulação o valor medido foi igual a 28,3 mm, enquanto o valor simulado foi 23,4 mm, com uma diferença de apenas 4,9 mm ou 0,7 mm d⁻¹. O erro quadrático foi de 3,56 mm (Tabela 7). Resultados semelhantes ao dessa pesquisa, também foram encontrados por outros autores que utilizaram o SiSPAT para simular a evaporação acumulada (BRAUD et al., 1995; VARADO; BRAUD; ROSS, 2006).

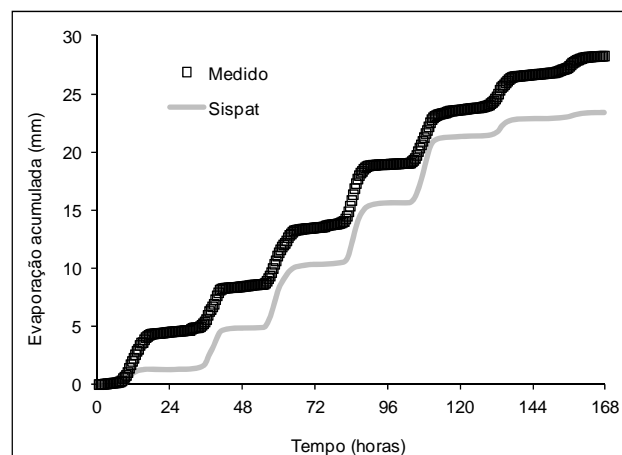


Figura 6 - Evaporação do solo acumulada, medida e simulada, durante o período de 14 a 20/03/2003 em Areia-PB

Tabela 7 - Índices estatísticos da avaliação do modelo SiSPAT para a evaporação acumulada (EAc)

	Índice	RMSE ¹	r	Índice	Desempenho
	d			c	
EAc	0,96	3,56	0,995	0,955	Ótimo

1. RMSE em mm

CONCLUSÕES

1. O modelo SiSPAT simulou adequadamente o perfil de umidade volumétrica do solo, bem como sua evolução temporal, quer seja em períodos sem precipitação pluvial, quer seja em períodos com precipitações elevadas. A evolução temporal da temperatura do solo foi bem simulada, principalmente para as camadas mais profundas.
2. Os componentes do balanço de energia (saldo de radiação e fluxos de calor latente, sensível e no solo) foram bem simulados, nas mais variadas condições de umidade do solo e atmosféricas.
3. A evaporação acumulada da água do solo foi simulada de forma correta pelo modelo SiSPAT, com uma diferença de apenas 0,7 mm d⁻¹ entre os valores medidos e simulados.
4. Tendo em vista o SiSPAT ter sido eficaz ao simular os fluxos de água e de energia e a evaporação da água do solo, nas condições climáticas da microbacia hidrográfica de Vaca Brava, Areia-PB, o mesmo tem o potencial de ser utilizado em conjunto com modelos meteorológicos para avaliar questões relativas à mudanças climáticas e/ou mudanças de uso da terra nessa região.

REFERÊNCIAS

- BARRETO, C. E. A. G.; WENDLAND, E.; MARCUZZO, F. F. N. Estimativa da evapotranspiração a partir de variação de nível estático de aquífero. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 1, p. 52-61, 2009.
- BATISTA, W. R. M. *Balanço de radiação e evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Jacaré – SE mediante imagens orbitais*. 2011. 80 p. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Sergipe, Aracaju. 2011.
- BOULET, G.; CHEHBOUNI, A.; GENTINE, P.; DUCHEMIN, B.; EZZAHAR, J.; HADRIA, R. Monitoring water stress using time series of observed to unstressed surface temperature difference. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 146, n. 3-4, p. 159-172, 2007.
- BOULET, G.; MOUGENOT, B.; ABDELOUAHAB, T. B. An evaporation test based on Thermal Infra Red remote-sensing to select appropriate soil hydraulic properties. *Journal of Hydrology*, v. 376, n. 3-4, p. 589-598, 2009.
- BRAUD, I.; BESSEMOULIN, P.; MONTENY, B.; SICOT, M.; VANDERVAERE, J. P.; VAUCLIN, M. Unidimensional modelling of a fallow savannah during the HAPEX-Sahel experiment using the SiSPAT model. *Journal of Hydrology*, v. 188-189, p. 912-945, 1997.
- BRAUD, I.; DANTAS-ANTONINO, A. C.; VAUCLIN, M.; THONY, J. L.; RUELLE, P. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *Journal of Hydrology*, v. 166, n. 3-4, p. 213-250, 1995.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. *Hydraulic properties of porous media*. Fort Collins, CO, USA: Colorado State University, 1964. (Hydrology paper, 30.
- BRUTSAERT, W. On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies. *Water Resources Research*, v. 11, n. 5, p. 742-744, 1975.
- CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CAMMALLERI, C.; AGNESE, C.; CIRAOLO, G.; MINACAPILLI, M.; PROVENZANO, G.; RALLO, G. Actual evapotranspiration assessment by means of a coupled energy/hydrologic balance model: Validation over an olive grove by means of scintillometry and measurements of soil water contents. *Journal of Hydrology*, v. 392, n. 1-2, p. 70-82, 2010.
- EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; COWAN, D. M.; SCHNEIDERMAN, E. M.; STEENHUIS, T. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. *Journal of Hydrology*, v. 348, n. 3-4, p. 279-291, 2008.
- GONDIM, R. S.; FUCK JUNIOR, S. C. F.; EVANGELISTA, S. R. M.; CASTRO, M. A. H.; TEIXEIRA, A. S. Impacto das mudanças climáticas na evapotranspiração em nível de bacia hidrográfica utilizando um Sistema de Informações Geográficas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 2, p. 5-12, 2011.

HAO, Y.; WANG, Y.; HUANG, X.; CUI, X.; ZHOU, X.; SHIPING WANG, S.; NIU, H.; JIANG, G. Seasonal and interannual variation in water vapor and energy exchange over a typical steppe in Inner Mongolia, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 146, n. 1-2, p. 57-69, 2007.

HORTON, R.; WIERENGA, P. J.; NIELSEN, D. R. Evaluation of methods for determining the apparent thermal diffusivity of soil near the surface. *Soil Science Society of American Journal*, v. 47, n. 1, p. 25-32, 1983.

IMMERZEEL, W. W.; DROOGERS, P. Calibration of a distributed hydrological model based on satellite evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 349, n. 3-4, p. 411-424, 2008.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIRA, C. A. B. O.; SOUZA, E. S.; SILVA, I. F. Balanço de energia e evapotranspiração de feijão caupi sob condições de sequeiro. *Revista Ciência Agronômica*, v. 42, n. 1, p. 65-74, 2011.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. cap. 13, p. 383-422.

MORET, D.; BRAUD, I.; ARRÚE, J. L. Water balance simulation of a dryland soil during fallow under conventional and conservation tillage in semiarid Aragon, Northeast Spain. *Soil and Tillage Research*, v. 92, n. 1-2, p. 251-263, 2007.

OLIVEIRA, I. A.; LIMA, J. R. S.; SILVA, I. F.; ANTONINO, A. C. D.; GOUVEIA NETO, G. C.; LIRA, C. A. B. O. Balanço de energia em mamona cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 4, n. 2, p. 185-191, 2009.

RIM, S.-C. Estimating evapotranspiration from small watersheds using a water and energy balance approach. *Hydrological Process*, v. 22, n. 5, p. 703-714, 2008.

SANTOS, A. C.; SALCEDO, I. H. Relevo e fertilidade do solo em diferentes estratos da cobertura vegetal na Bacia Hidrográfica da represa Vaca Brava, Arcia, PB. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 277-285, 2010.

SOARES, W. A. *Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste no Brasil*. 2009. 163 p. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

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*, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008b.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ÂNGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, E. B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 1795-1804, 2008a.

STRICEVIC, R.; COSIC, M.; DJUROVIC, N.; PEJIC, B.; MAKSIMOVIC, L. Assessment of the FAO AquaCrop model in the simulation of rainfed and supplementally irrigated maize, sugar beet and sunflower. *Agricultural Water Management*, v. 98, n. 10, p. 1615-1621, 2011.

van GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VARADO, N.; BRAUD, I.; ROSS, P. J. Development and assessment of an efficient vadose zone module solving the 1D Richards' equation and including root extraction by plants. *Journal of Hydrology*, v. 323, n. 1-4, p. 258-275, 2006.

VRIES, D. A. Thermal properties of soils. In: van WIJK, W.R., Ed. *Physics of plant environment*. 2nd ed. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1966. p. 210-233.

Simulation Of Water And Energy Fluxes In The Catchment Of The Vaca Brava Dam At Brejo Paraibano

ABSTRACT

It is important to understand and quantify water and energy transfer in soil-plant-atmosphere systems for meteorological, agronomic and hydrological purposes, and there are several models to describe these heat and mass fluxes. This study aims at simulating energy and water

fluxes using SiSPAT (Simple Soil-Plant-Atmosphere Transfer model), in the Vaca Brava river basin, in Areia-PB. The input data were obtained from measurements collected at a 4 ha experimental site (6° 58' S, 35° 41' W and 620 m altitude). The site was equipped with an automatic micro-meteorological tower, to estimate the energy balance components for the Bowen ratio method, and soil evaporation. Sensors were also installed in the soil to measure temperature and volumetric soil moisture profiles. The results showed that SiSPAT was excellent to simulate the energy balance and soil evaporation components under various weather and soil moisture conditions. SiSPAT also adequately simulated the soil water content profile, and its temporal evolution during dry periods without precipitation, and during periods of heavy rain. The same observation was demonstrated for the temporal evolution of soil temperature.

Keywords: SiSPAT. Soil water content. Evaporation.