

Experimentação e modelagem do avanço de sais no perfil do solo em área cultivada com repolho sob alternativas de manejo de irrigação, no semiárido de Pernambuco

Suzana G. L. Montenegro¹, José G. da Silva Junior², Abelardo A. de A. Montenegro², José F. de Carvalho² & João A. C. Albuquerque Filho²

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, CEP 50670-901, Recife-PE, Brasil. E-mail: suzanam@ufpe.br

² Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Tecnologia Rural, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife-PE, Brasil. E-mail: gracilianojrster@gmail.com; abelardo.montenegro@yahoo.com.br; carvalho.jcarvalho20@gmail.com; jaudifax@dtr.ufrpe.br

RESUMO

No semiárido brasileiro, a pequena agricultura familiar constitui suporte financeiro a pequenas comunidades rurais mas, em decorrência do elevado déficit hídrico o manejo de irrigação é de grande importância e a modelagem numérica se destaca como ferramenta para avaliação prévia do desempenho das práticas potenciais no controle da salinização. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho do modelo SALTMED na predição da umidade e salinidade no perfil do solo em área cultivada com repolho, nas profundidades de 20 e 40 cm e frequências de irrigação de 12, 24 e 48 h. O modelo foi calibrado e validado com observações diárias medidas em campo considerando-se aspectos dos recursos naturais (solo e água), clima, cultura e sistema de irrigação. A calibração foi efetuada para parcela com frequência de irrigação de 24 h e a validação com frequências de 12 e 48 h em Neossolo no município de Pesqueira, PE. O modelo foi calibrado adequadamente e validado para todas as profundidades podendo ser utilizado para análise do manejo integrado que maximize o rendimento do cultivo de repolho, em áreas semelhantes e com risco de salinização.

Palavras-chave: manejo da irrigação, modelo SALTMED, salinidade, transporte de solutos

Experimentation and modeling of salt movement in an area cropped with cabbage under different irrigation management conditions in the semi-arid of Pernambuco State (Brazil)

ABSTRACT

In the Brazilian semi-arid region, small scale agriculture constitutes financial support for small rural communities. However, due to the high water deficit, irrigation management is of high importance for the development of the agriculture, and numerical modeling is an useful tool towards evaluating in advance the performance of practical techniques for salinization control. Thus, the objective of this study was to apply the SALTMED model to simulate soil moisture and salinity in a soil profile cropped with cabbage, at 20 cm and 40 cm depths under irrigation frequencies of 12, 24 and 48 hours. The model was calibrated and validated using daily field observations, considering the natural resources aspects (soil and water), climate, crop, and irrigation system. The experiment with the irrigation frequency of 24 hours was used for calibration, while the experiments with irrigation frequencies of 12 and 48 hours were used for validation in area with Neosol, in the Municipal District of Pesqueira-PE. The model was properly calibrated and validated for all depths, and it can be used for analysing integrated management which maximizes cabbage response in similar areas and under salinization risk.

Key words: integrated irrigation management, SALTMED model, salinity, solute transport

INTRODUÇÃO

A expansão da agricultura irrigada tem-se tornado preocupante devido ao elevado consumo e às restrições de disponibilidade de água, bem como ao risco de degradação dos recursos naturais envolvidos. No Nordeste brasileiro o elevado déficit hídrico contribui também para o incremento da salinidade da água e solo nas áreas irrigadas. Nos vales aluviais do semiárido tem-se praticado com vigor a pequena agricultura irrigada uma vez que os recursos hídricos superficiais são escassos, destacando-se os mananciais subterrâneos como o principal recurso para suporte a tal atividade. Nessas áreas a irrigação pode incidir em impactos ambientais quanto ao solo e à água subterrânea, pela susceptibilidade de salinização dos recursos naturais dos vales aluviais do semiárido nordestino (Montenegro et al., 2010).

No semiárido nordestino, inclusive nas áreas aluvionares com quadro de escassez de recursos hídricos, a cultura do repolho é importante por fazer parte do panorama da exploração agrícola em escala familiar irrigada, por se tratar de instrumento gerador de renda e por ser promotor de desenvolvimento social (e.g. Moura et al., 2006; Montenegro et al., 2010) embora possa ter sua produtividade afetada em função da salinidade da água de irrigação e na ausência de manejo adequado (Carvalho et al., 2011).

A gestão dos recursos hídricos em áreas irrigadas no semiárido deve focar aspectos não apenas relacionados ao uso eficiente da água mas também ao controle da salinização da água e do solo, cuja ocorrência está relacionada a fatores naturais (solo e clima) e à prática da irrigação.

A frequência de irrigação possui papel relevante no controle da salinização. Montenegro et al. (2010) destacaram o controle da frequência de irrigação como uma das práticas potenciais de manejo de água disponível aplicável a solos e águas salinas. Alternativas de manejo diversas, incluindo a adoção de frequência adequada, podem ser previamente testadas através de modelagem matemática.

Estudos recentes aplicaram modelos de simulação de fluxo e transporte de soluto em zona não saturada, calibrados e validados com dados de campo para avaliação de alternativas de manejo de irrigação (e.g. Gawad et al., 2005; Bastos et al., 2009; Monteiro et al., 2009; Forkutsa et al., 2009; Ramos et al., 2011). Em particular, o modelo SALTMED vem sendo aplicado em regiões de clima semiárido e para culturas diversas, apresentando bom desempenho (e.g. Ragab et al. 2005a,b; Golabi et al., 2009; Montenegro et al., 2010; Silva et al., 2012; Hirich et al., 2012).

Diante deste contexto, o objetivo da pesquisa foi avaliar o desempenho do modelo SALTMED com dados de experimento de campo, em simular o conteúdo de umidade e salinidade no perfil do solo no cultivo do repolho, em duas profundidades do solo e com as seguintes práticas de manejo: Sistema de irrigação localizada por microaspersão, aplicação de lâminas constantes com água moderadamente salina e três frequências de irrigação.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo e experimento

O trabalho foi desenvolvido na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, município de Pesqueira, PE, na Região Agreste do Estado de Pernambuco, distando 230 km de Recife e a 650 m acima do nível do mar. As coordenadas geográficas locais são 8° 34' 17" S e 37° 1' 20" W de latitude e longitude (Carvalho et al., 2011). O clima do local é classificado, segundo Köppen, como BShw' semiárido quente, caatinga hiperxerófila. A precipitação média anual na região é de 730 mm com temperatura média de 27 °C e a evapotranspiração potencial é de cerca de 1680 mm. As precipitações ocorridas durante a condução do experimento estão apresentadas na Figura 1, tal como as lâminas de irrigação para a frequência de 24 h.

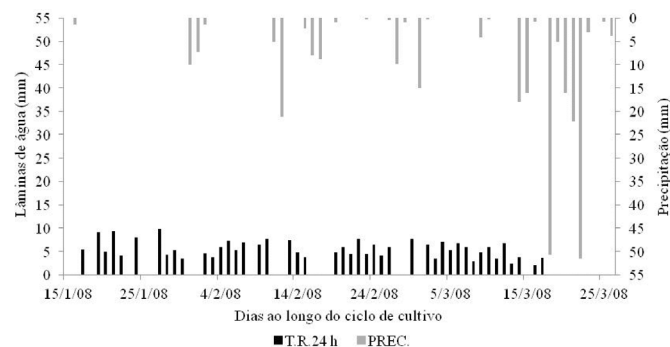


Figura 1. Precipitações e lâminas diárias aplicadas ao longo do experimento no período de 01/01/2008 a 29/03/2008

As sementes do repolho variedade Midori (*Brassica oleracea* var. *capitata* L.) foram semeadas em um canteiro de dimensões 20,00 x 1,00 m, confeccionado no campo próximo à área de cultivo, em 22 de novembro de 2007 e em 03 de janeiro de 2008 as mudas foram transplantadas para as parcelas experimentais a um espaçamento médio de 0,30 x 0,50 m entre mudas. As parcelas experimentais foram espaçadas 10,00 x 2,70 m, com bordaduras obedecendo ao mesmo espaçamento.

O cultivo foi desenvolvido em condições de irrigação localizada por sistema de microaspersão, no total de 264 microaspersores distanciados a cada 3 m com raio de alcance de 3 m, rotação de 360° sob pressão média de serviço de 213,9 kPa e vazão de 54,26 L h⁻¹, proporcionando uma intensidade média de aplicação de 6,03 mm h⁻¹ na área experimental.

A captação da água foi feita através de Poço Amazonas existente na área, operando com vazão de 4,50 m³ h⁻¹. No experimento foram utilizados três turnos de rega considerando-se a lâmina aplicada em diferentes frequências (12, 24 e 48 h). A salinidade da água do poço utilizado como suprimento hídrico para a irrigação foi monitorada mensalmente, durante o período do experimento.

As parcelas receberam a mesma lâmina variando apenas os horários, ou seja, nos manejos de frequência de 12 h se aplicava a lâmina diária em dois horários, metade pela manhã e a outra metade no final da tarde; nos de 24 h aplicava-se essa mesma lâmina no final da tarde, e para os manejos de frequência de 48 h aplicava-se a lâmina correspondente à evaporação do Tanque Classe A dos dois dias consecutivos, sempre ao final da tarde.

O manejo da irrigação foi realizado diariamente, com base na evapotranspiração potencial da cultura calculada a partir de medições do tanque “Classe A” e se considerando as precipitações que ocorreram durante o ciclo da cultura. Essas variáveis foram usadas para estimar a lâmina necessária de irrigação considerando-se o K_c (coeficiente de cultura) de 0,75 para o período inicial do cultivo até o 34º dia, caracterizando a fase de emergência e a formação das folhas (4 de janeiro a 7 de fevereiro 2008). Nos períodos seguintes utilizou-se o K_c de 0,95 caracterizando a fase de desenvolvimento vegetativo (8 a 26 de fevereiro, 19 dias) e o K_c de 0,80 na terceira fase de desenvolvimento da cultura, conhecida como maturação. Nos períodos seguintes utilizou-se o K_c de 0,95 (8 a 26 de fevereiro, 19 dias) e o K_c de 0,80 (27 de fevereiro até a data da colheita 27 de março 2008, 29 dias), respectivamente. Os valores de K_c foram considerados com base no boletim da FAO-24 (Doorenbos & Pruitt, 1997). O coeficiente do tanque (K_p) foi de 0,75 para todo o ciclo da cultura, conforme Doorenbos & Kassam (1979) e as condições locais.

Adotou-se um coeficiente de lixiviação de 20% de modo a promover uma quantidade suplementar de água ao terreno, sendo esta quantidade de água responsável pela drenagem do excesso de sais ao longo da zona radicular da cultura para camadas inferiores do solo (Carvalho et al., 2011), embora esta componente do balanço não tenha sido monitorada.

Para mensurar a salinidade amostras da solução do solo eram obtidas através de oito extratores instalados na parcela correspondente ao manejo de 24 h. Os extratores eram providos de cápsulas cerâmicas porosas em sua extremidade inferior e borrachas especiais com vedação de silicone na extremidade superior, tendo sido instalados a aproximadamente 20 cm de distância da planta. Para extrair a solução através deste dispositivo foi promovida, em cada extrator, uma tensão de aproximadamente 80 kPa por meio de uma bomba a vácuo. As cápsulas foram instaladas nas profundidades de 20 e 40 cm da superfície do solo. A coleta da solução nos extratores foi realizada 24 h após a sucção que, por sua vez, era realizada 2 h após a irrigação. No total, cinco amostragens foram realizadas durante o ciclo de cultivo.

A precipitação local era medida diariamente através de pluviômetros, bem como o monitoramento diário da umidade do solo, através de Sonda de Nêutrons. A salinidade da água subterrânea foi monitorada periodicamente por meio dos poços de observação, instalados próximos ao lote irrigado, na profundidade de 5 m.

Descrição do modelo SALTMED

Dentre os diferentes modelos de fluxo e transporte de soluto na zona não saturada disponíveis com aplicações, a análise de alternativas de manejo da irrigação (e.g. HYDRUS, WAVE), o SALTMED foi selecionado pela sua simplicidade de uso e por incorporar os principais processos que interferem na análise do problema. O modelo foi usado por Montenegro et al. (2010) em área do mesmo vale aluvial, com bons resultados, possibilitando calibração adequada e validação de experimentos com cenoura e repolho.

A concepção original do modelo é descrita em detalhes em Ragab (2002), com alguns exemplos de aplicação e abrange

simulações dos seguintes processos: evapotranspiração, transporte de água e solutos para diferentes sistemas de irrigação a relação entre o rendimento da cultura e o uso da água. Com uma interface gráfica amigável o SALTMED foi desenvolvido para ser processado na plataforma Windows XP e contém três bancos de dados residentes para solo, cultura e sistemas de irrigação.

O SALTMED é um modelo de fácil manipulação e é aplicável para diferentes cultivos, solos, sistemas de irrigação e estratégias de manejo de água. O modelo SALTMED é baseado nas seguintes equações: Penman-Monteith FAO-56 (1998) para cálculo da evapotranspiração de referência; equação de Richards para fluxo de água, resolvida por Diferenças Finitas; equação de convecção-dispersão resolvida por Diferenças Finitas para o transporte de solutos; funções de van Genuchten, conforme van Genuchten (1987), para condutividade hidráulica e para a curva de retenção de água no solo.

Nos dados de entrada do modelo estão inclusos a taxa de irrigação em $\text{cm}^3 \text{min}^{-1}$, a salinidade da água de irrigação, a precipitação, parâmetros das funções de van Genuchten, dados climatológicos ou evaporação da lâmina líquida do Tanque Classe A, para estimativa da evapotranspiração de referência, condutividade hidráulica saturada, umidade inicial do solo, salinidade inicial do solo, tipo de sistema de irrigação e frequência utilizada, além de informações gerais da cultura em estudo, tais como: estágios de crescimento, produtividade, coeficiente da cultura; informações sobre as características físicas das camadas do solo estudado.

O SALTMED processa as variáveis para cada camada ao longo do perfil do solo para o intervalo de 1 dia. A extensão vertical utilizada na modelagem foi de 1 m, com 25 elementos de 5,0 cm. A condição de contorno inferior adotada foi de drenagem livre. Neste estudo as variáveis medidas e simuladas foram umidade e salinidade do solo.

A calibração do modelo consistiu em tentativas de variação dos parâmetros buscando o melhor ajuste da umidade calculada pelos dados medidos em campo. O desempenho do processo de calibração é influenciado pela inicialização das umidades e salinidades do perfil. Na modelagem com o modelo SALTMED foram utilizados os manejos com frequência de 24 h para calibração e de 12 e 48 h para validação; esta escolha foi ao acaso, com o objetivo apenas de separar o conjunto de dados do experimento para as fases de calibração e validação do modelo.

Desempenho estatístico do modelo

O desempenho de modelos matemáticos foi verificado por meio dos seguintes índices estatísticos: novo índice de concordância de Willmott (d_r), o erro absoluto médio (MAE, sigla em inglês), o desvio absoluto médio (MAD, sigla em inglês), a raiz do erro quadrático médio (RMSE, sigla em inglês) apresentados por Willmott et al. (2012), o erro máximo (ME, sigla em inglês), o coeficiente residual de massa (CRM) e o coeficiente de correlação de Pearson (r).

O coeficiente de correlação de Pearson (r) e o novo índice de concordância de Willmott (d_r) são usados para avaliar a precisão e a exatidão do modelo, respectivamente. Este novo índice proposto por Willmott et al. (2012) é menos sensível

à variação dos erros concentrados em dados discrepantes (outliers) e varia de -1 a 1, sendo que o valor zero corresponde a nenhuma concordância enquanto o valor absoluto um, a uma concordância perfeita. O erro absoluto médio (MAE), o desvio absoluto médio (MAD), o erro máximo (ME) e a raiz do erro quadrático médio (RMSE) são usados para estimar os erros representados pelas diferenças médias entre os dados preditos pelo modelo (P) e os dados observados (O). O RMSE fornece uma informação sobre a dispersão dos dados, ou seja, o grau de espalhamento obtido entre os dados preditos e os observados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cultura do repolho e salinidade da água

No cultivo do repolho variedade Midori, obteve-se uma produtividade média de 34.330 kg ha⁻¹, podendo-se observar, numérica e estatisticamente, que o melhor rendimento da cultura em função das frequências foi correspondente à irrigação a cada 12 horas (Tabela 1) devido, provavelmente, ao efeito do arrefecimento das plantas olerícolas promovido pela microaspersão de maior frequência, conforme observado por Scaloppi (1986) e Moura et al. (2006), especificamente para a cultura do repolho.

Tabela 1. Valores médios da produtividade e intervalo de confiança de 95% em cada frequência de rega

Produtividade média	kg ha ⁻¹
Frequência de 12 horas	37.500 a ± 3.171,71
Frequência de 24 horas	34.190 b ± 1.889,05
Frequência de 48 horas	31.240 b ± 3.861,25

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem entre intervalos de irrigação pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Verificou-se que as produtividades obtidas no experimento (Tabela 1) estão dentro dos valores estabelecidos por Tivelli & Purquerio (1998), variando de 30.000 a 60.000 kg ha⁻¹. Souza (1999) obteve, no sistema de cultivo orgânico, uma produtividade média de 25.760 kg ha⁻¹ utilizando a mesma variedade. Montenegro et al. (2010) reportaram experimento com repolho da mesma variedade nessa área, entre maio e julho de 2002 e frequência de irrigação de 48 h, com produtividade de 39.000 kg ha⁻¹.

Na Tabela 2 estão representados os valores da condutividade elétrica (CE) da água do poço utilizada na irrigação, durante o cultivo do repolho. A qualidade da água de irrigação utilizada no experimento, segundo o Laboratório de Salinidade dos Estados Unidos, é classificada como (C₃), ou seja, água com salinidade alta (CE entre 0,75 e 2,25 dS m⁻¹, a 25 °C), não sendo recomendável seu emprego em solos com deficiência de drenagem. Mesmo em situação de drenagem adequada, são necessárias, em alguns casos, práticas especiais para o controle da salinidade. Esta água pode ser usada somente em plantas moderadamente tolerantes aos sais (Bernardo et al., 2008).

Tabela 2. Condutividade elétrica da água de irrigação

Poço	Coordenadas numéricas		CE (dS m ⁻¹)		
	X	Y	Jan/2008	Fev/2008	Mar/2008
	P2	735631	9071310	1,10	1,25

Na Tabela 3 estão representados os valores de condutividade elétrica estimados através das extrações de cápsulas porosas instaladas na parcela com manejo de frequência de 24 h. Observa-se que os valores de condutividade elétrica apresentaram diminuição nos meses de fevereiro e março quando comparados com os valores de janeiro, o que pode ser explicado pela lavagem de sais na camada estudada neste período, a partir dos eventos de chuva mais intensos nos meses de fevereiro e março, conforme Figura 1.

Tabela 3. Condutividade elétrica medidas nas cápsulas de extração para a frequência de irrigação de 24 h nas camadas de 0-20 e 20-40 cm, durante o período de cultivo do repolho

Profundidades (cm)	Condutividade Elétrica (dS m ⁻¹)				
	31/Jan	09/Fev	08/Mar	16/Mar	26/Mar
20	2,02	1,55	1,45	2,10	2,14
40	4,60	3,20	2,00	2,00	1,60

Modelagem matemática

Na Tabela 4 estão representados os valores calibrados dos parâmetros e das propriedades hidráulicas do solo para as duas camadas avaliadas durante o experimento.

Tabela 4. Propriedades hidráulicas e parâmetros do solo da área experimental utilizados no ajuste do modelo

Propriedades do solo	Unidades	Franco (cm)	
		0-20	20-40
θ _{cc}	cm ³ cm ⁻³	0,27	0,25
θ _{PM}	cm ³ cm ⁻³	0,12	0,11
λ	-	0,317	0,424
θ _R	cm ³ cm ⁻³	0,076	0,080
θ _S	cm ³ cm ⁻³	0,42	0,41
K _{Sat}	mm dia ⁻¹	945,95	945,95
ψ _{ae}	cm	19,12	77,52
Disp. Long.	mm	2,0	2,0
Disp. Transv.	mm	0,1	0,1
CEc	dS m ⁻¹	5,0	4,0

θ_{cc} - Umidade de capacidade de campo; θ_{PM} - Umidade de ponto de murcha; λ - Índice de distribuição do tamanho dos poros; θ_R - Umidade residual; θ_S - Umidade de saturação; K_{Sat} - Condutividade hidráulica saturada; ψ_{ae} - Pressão de borbulhamento; Disp. Long. - Dispersividade longitudinal; Disp. Transv. - Dispersividade transversal; CEc - Condutividade elétrica do solo

Os parâmetros de maior sensibilidade na modelagem foram a condutividade hidráulica saturada K_{Sat} e a umidade de saturação do solo θ_S.

Simulações para umidade do solo: calibração e validação

As simulações realizadas no modelo SALTMed apresentaram ajustes satisfatórios para as umidades simuladas, quando comparadas com as umidades medidas em campo durante a fase de calibração, com os parâmetros apresentados na Tabela 4. Na Figura 2A e 2B observa-se a mesma tendência entre os dados simulados e os medidos, para a profundidade de 20 e 40 cm na frequência de 24 h; entretanto se observa graficamente, que para a profundidade de 40 cm a concordância foi maior entre os dados medidos e os simulados, quando comparados com os dados obtidos na profundidade de 20 cm, resultado que pode ser devido a uma uniformidade maior no umedecimento do solo a 40 cm de profundidade, podendo também, estar associado a incertezas nas condições de contorno na superfície do solo. Com efeito, comparando as umidades medidas a 20 e 40 cm (Figura 2A e B) pode-se constatar maior variabilidade temporal da umidade na menor profundidade.

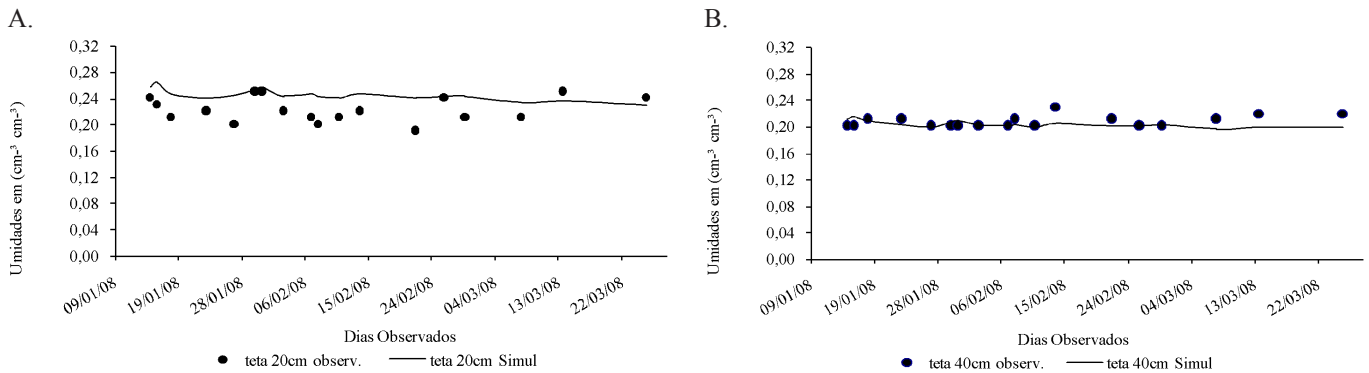


Figura 2. Comparação entre as umidades simuladas e as umidades observadas (Calibração). (A) profundidade de 20 cm e (B) profundidade de 40 cm para a frequência de irrigação de 24 h

Uma vez calibrado o modelo procedeu-se à validação considerando-se os valores observados para as frequências de irrigação de 12 e 48 h (Tabela 4). Nas Figuras 3A e 3B observa-se uma mesma tendência entre os valores simulados e os medidos, para as profundidades de 20 e 40 cm, na frequência de 12 h. Na Figura 4A e 4B observa-se, igualmente, uma mesma tendência entre as umidades simuladas e as medidas, para as profundidades de 20 e 40 cm, na frequência de 48 h. No entanto, pode-se constatar novamente, que para a profundidade de 40 cm houve melhor ajuste entre os dados simulados e os medidos. Montenegro et al. (2010) também obtiveram bons ajustes na calibração e validação do modelo SALTMED para as culturas do repolho, cenoura e mamona em outros lotes irrigados na área em estudo. Os autores reportam a importância da calibração e validação para áreas específicas tendo em vista

a variabilidade espacial das propriedades do solo tal como as diferenças entre as propriedades intrínsecas das culturas que compõem o conjunto de parâmetros de calibração do modelo. Outros autores também reportaram, trabalhando com outros modelos, a importância da calibração e validação dos modelos para situações específicas de campo (e.g. Golabi et al., 2009; Ramos et al., 2011). Silva et al. (2012) também destacam a importância de se considerar informações sazonais para calibração e validação do modelo; entretanto, tal verificação está além do escopo deste estudo, que foi desenvolvido para uma cultura temporária de ciclo curto, ao final da estação seca na região.

Na Tabela 5 estão os resultados dos índices estatísticos de comparação entre os dados preditos e os observados da umidade do solo, especificados por frequências de rega e

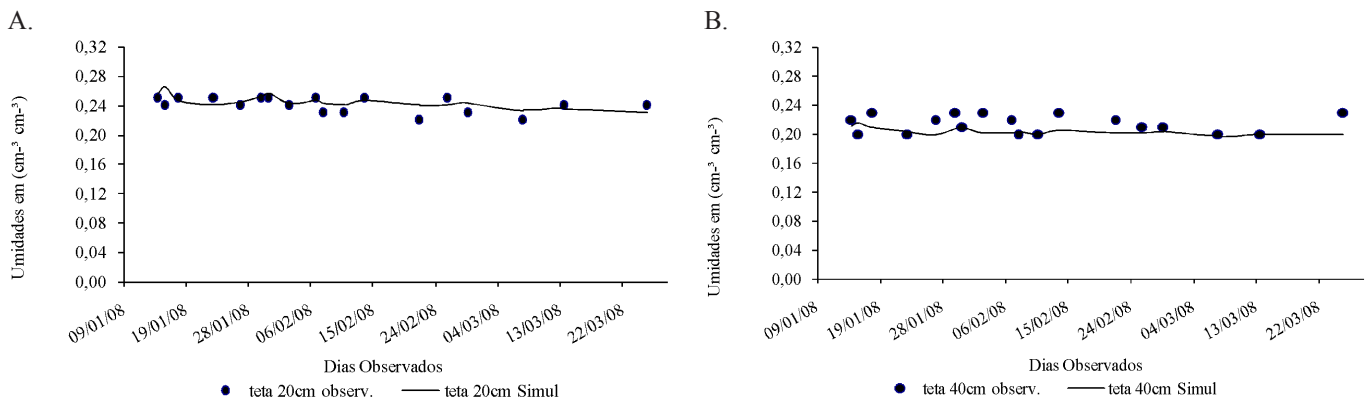


Figura 3. Comparação entre valores de umidade observados e simulados (Validação) aplicando-se a frequência de irrigação de 12 h. (A) profundidade de 20 cm e (B) profundidade de 40 cm

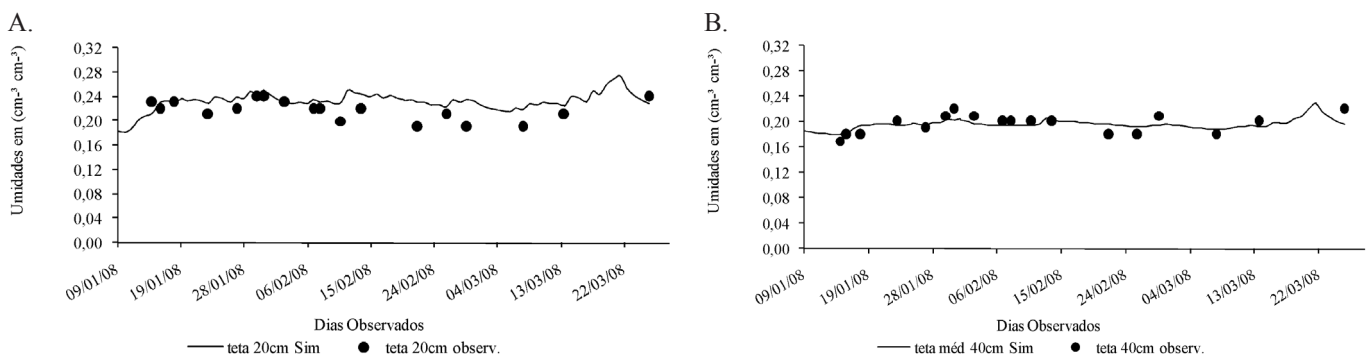


Figura 4. Comparação entre valores simulados e medidos da umidade (Validação) para a frequência de irrigação de 48 h. (A) profundidade de 20 cm e (B) profundidade de 40 cm aplicando-se a frequência de irrigação de 48 h

Tabela 5. Índices estatísticos de comparação entre resultados observados e simulados das umidades no perfil do solo para as duas profundidades distintas e três frequências de irrigação (Calibração e Validação)

Frequências (horas)	Profundidade (cm)	d_r	MAE	MAD	RMSE	ME	CRM
12	20	0,4757	0,0088	0,0083	0,0105	0,0241	0,0160
	40	0,3960	0,0134	0,0111	0,0167	0,0316	0,0524
24	20	0,2240	0,0249	0,0160	0,0286	0,0500	0,0999
	40	0,4091	0,0087	0,0074	0,0116	0,0247	0,0167
48	20	0,3263	0,0180	0,0134	0,0216	0,0462	0,0689
	40	0,6118	0,0097	0,0125	0,0112	0,0224	0,0072

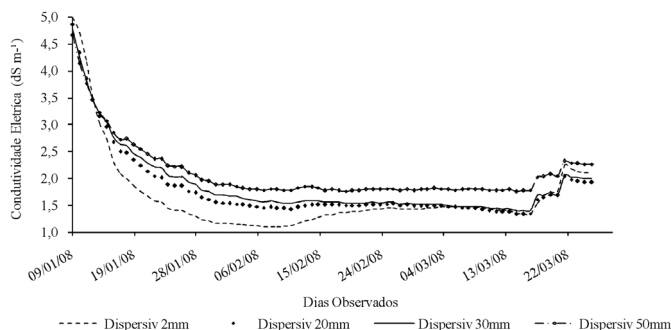
profundidades do solo. Observa-se, nesta tabela, o novo índice de concordância de Willmott (d_r) de 0,6118, na frequência de rega de 48 h e profundidade de 40 cm, indicando melhor precisão e exatidão do modelo.

Montenegro et al. (2010) e Silva et al. (2012), dentre outros, também usaram índices estatísticos para atestar a qualidade do ajuste entre valores medidos e simulados na calibração e validação. Mesmo com índices estatísticos apenas razoáveis neste estudo pode-se constatar, pela avaliação visual, o desempenho adequado do modelo, o qual representa razoavelmente bem a dinâmica de água do solo na área.

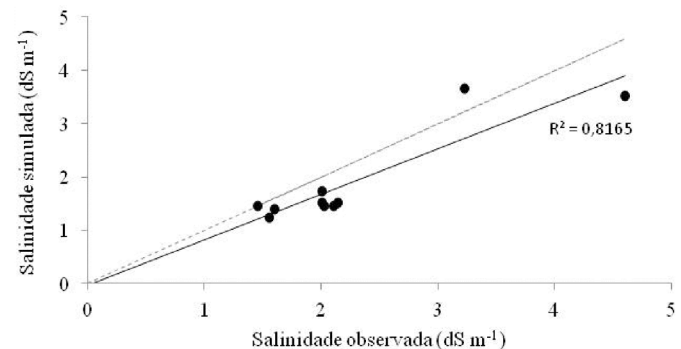
Simulações para salinidade do solo

Como não se dispunha de valores medidos dos parâmetros de transporte foi desenvolvida uma análise de sensibilidade para averiguar seu grau de influência nos resultados do modelo, em relação à dispersividade longitudinal por ser este parâmetro de fundamental importância na simulação do transporte de soluto considerando-se fluxo unidimensional na direção vertical.

Foram realizadas simulações considerando-se os parâmetros da cultura e hidrodinâmicos obtidos pela calibração/validação de modelo e se adotando os valores de 2, 20, 30 e 50 mm para a dispersividade longitudinal. A comparação dos resultados das simulações em termos temporais da condutividade elétrica na profundidade de 20 cm, é apresentada na Figura 5. Os resultados obtidos não variaram significativamente entre as simulações demonstrando uma relativamente baixa sensibilidade do resultado a este parâmetro. Adotou-se, então, o valor de 20 mm para as simulações de transporte de solutos com o SALTMED em virtude de fornecer condutividades elétricas que se aproximam da média dos valores obtidos na análise de sensibilidade. Analisando alternativas de manejo de irrigação em solos de lisímetros de drenagem na mesma área de estudo, Monteiro et al. (2009) calibraram este parâmetro e encontraram o valor de 4 cm para solo deformado.

**Figura 5.** Análise de sensibilidade do modelo para parâmetros de dispersividade

As simulações realizadas no modelo SALTMED também apresentaram ajustes satisfatórios para os dados simulados de salinidade quando comparados com os dados de salinidades medidos em campo, obtidos através das cápsulas de extração para o manejo correspondente à frequência de rega de 24 h. A comparação dos valores de salinidade nas profundidades de 20 e 40 cm apresenta coeficiente de determinação elevado, $R^2 = 0,8165$. Optou-se por conduzir a análise de correlação utilizando, conjuntamente, os valores nas duas profundidades de modo a investigar o comportamento global das simulações, sem filtragem de valores.

**Figura 6.** Correlação das salinidades simuladas e medidas nas profundidades de 20 e 40 cm para frequência de 24 h

De outro modo, a avaliação do desempenho do modelo SALTMED, com base nos resultados dos índices estatísticos aplicados aos dados preditos e observados da salinidade do solo, foi a que seguem na Tabela 6.

Tabela 6. Índices estatísticos de comparação entre resultados observados e simulados da salinidade no perfil do solo para as profundidades de 20 e 40 cm, na frequência de 24 h

Prof. (cm)	d_r	MAE	MAD	RMSE	ME	CRM
20 e 40	0,6358	0,4760	0,6536	0,5481	1,1000	0,1615

Observações de salinidade são de mais difícil obtenção em experimentos de campo e alguns autores adotam a opção de calibrar e validar o modelo para dados de umidade ou potencial matricial e utilizar o modelo para análise de cenários considerando o movimento de solutos no perfil do solo (Monteiro et al., 2009).

CONCLUSÕES

As simulações realizadas nas fases de calibração e validação do modelo SALTMED apresentaram ajustes aceitáveis aos valores medidos de umidade e salinidade da água no solo.

Foi possível calibrar e validar o modelo SALTMED, haja vista que o mesmo pode ser utilizado como ferramenta para a simulação de avanço de sais em meio irrigado, em Neossolos Flúvicos similares ao estudado, para proposição de alternativas de manejo.

Na predição da umidade volumétrica e da salinidade do solo os índices estatísticos indicaram bom desempenho do modelo SALTMED na previsão da dinâmica de água e soluto no solo, na área em estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte do pesquisador Ragab Ragab, do Centre for Ecology and Hydrology (Wallingford, Reino Unido) pela disponibilização do programa SALTMED e pelo suporte prestado para treinamento de sua utilização. Os autores agradecem, também, ao CNPq e ao CT-HIDRO, pelo financiamento ao projeto de pesquisa, bolsas de Mestrado e Bolsas PQ, tanto quanto, também, a contribuição dos revisores.

LITERATURA CITADA

- Bastos, D. C. de O.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.. Avaliação de alternativa de irrigação suplementar com água moderadamente salina em vale aluvial no semiárido: experimentação e modelagem. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, n.3, p.27-36, 2009. <http://www.abrh.org.br/novo/download_file.php?filename=MDAwMDAyNjcuZmFydHxBdmFsaWHn428gZGEgQWx0ZXJuYXRpdmcGRmfGFwcGxpY2F0aW9uL3BkZg%3D%3D>. 22 Ago. 2012.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 625p.
- Carvalho, J. F.; Montenegro, A. A. A.; Soares, T. M.; Silva, E. F. F.; Montenegro, S. M. G. L. Produtividade do repolho utilizando cobertura morta e diferentes intervalos de irrigação com água moderadamente salina. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, n.3, p.253-263, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000300006>>
- Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Crop water requirements. *Campina Grande: FAO*, 1997. 179p. (FAO. Irrigation and drainage paper, 24).
- Doorenbos, J.; Kassam, A. H. Efectos del agua en al rendimiento de los cultivos. *Roma: FAO*, 1979. p.212 (Riego y drenaje, 33).
- Forkutsa, I., Sommer, R., Shirokova, Y.I., Lamers, J.P.A., Kienzler, K., Tischbein, B., Martius, C.; Vlek, L.G. Modeling irrigated cotton with shallow groundwater in the Aral Sea Basin of Uzbekistan: II. Soil salinity dynamics. *Irrigation Science*, v.27, n.4, p.319-330, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00271-009-0149-0>>
- Gawad, G. A.; Arslan, A.; Gaihbe, A.; Kadouri, F. The effects of saline irrigation water management and salt tolerant tomato varieties on sustainable production of tomato in Syria (1999–2002). *Agricultural Water Management*, v.78, n.1-2, p.39–53, 2005. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.024>>
- Golabi, M.; Naseri, A.A.; Kashkuli, H.A. Evaluation of SALTMED model performance in irrigation and drainage of sugarcane farms in Khuzestan province of Iran. *Journal of Food, Agricultural & Environmental*, v.7, n.2, p.874–880, 2009. <<http://www.isfae.org/scientificjournal/2009/issue2/abstracts/abstract161.php>>. 28 Jul. 2012.
- Hirich, A.; Choukr Allah, R.; Ragab, R.; Jacobsen, L.S.E. The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. *Journal of Materials and Environmental Science*, v.3, n.2, p.342-359, 2012. <http://www.jmaterenvironsci.com/Document/vol3/vol3_N2/33-JMES-167-2011-Hirich.pdf>. 28 Jul. 2012.
- Monteiro, A. L. N.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.; Santos, F. X. dos. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado utilizando modelagem computacional. *Engenharia Agrícola*, v.29, n.2, p.202-220, 2009. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162009000200004>>
- Montenegro, S. G.; Montenegro, A. A. de A.; Ragab, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. *Irrigation Science*, v.28, n.4, p.301-316, 2010. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00271-009-0191-y>>
- Moura; E.G; Rezende, K.D.A.; Araujo, J.C.; Castro, M.F. Efeito de métodos de irrigação e do uso de cobertura vegetal sobre o cultivo de repolho em São Luís-MA. *Horticultura Brasileira*, v.24, n.4, p.410-413, 2006. <<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362006000400003>>
- Ragab, R.; Malash, N.; Abdel Gawad, G.; Arslan, A.; Ghaibeh, A. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management. 1. The SALTMED model and its calibration using field data from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, v.78, n.1-2, p.67–88, 2005a. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.022>>
- Ragab, R.; Malash, N.; Abdel Gawad, G.; Arslan, A.; Ghaibeh, A. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management. 2. The SALTMED model validation using field data of five growing seasons from Egypt and Syria. *Agricultural Water Management*, v.78, n.1-2, p.89–107, 2005b. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.023>>
- Ragab, R. A holistic generic integrated approach for irrigation, crop and field management: the SALTMED model. *Environmental Modelling & Software*, v.17, n.4, p.345-361, 2002. <[http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152\(01\)00079-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-8152(01)00079-2)>
- Ramos, T. B.; Šimůnek, J.; Gonçalves, M. C.; Martins, J. C.; Prazeres, A.; Castanheira, N. L.; Pereira, L. S. Field evaluation of a multicomponent solute transport model in soils irrigated with saline waters, *Journal of Hydrology*, v.407, n.1-4, p.129-144, 2011. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.016>>
- Scaloppi, E.J. Características principais dos sistemas de irrigação. *Irrigação e Tecnologia Moderna*, v.25, p.22-27, 1986.
- Silva, L.L.; Ragab, R.; Duarte, I.; Lourenço, E.; Simões, N.; Chaves, M.M. Calibration and validation of SALTMED model under dry and wet year conditions using chickpea field data from Southern Portugal. *Irrigation Science*, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1007/s00271-012-0341-5>>

- Souza, J.L. Cultivo Orgânico de Hortaliças – brócolis, couve-flor e repolho. Viçosa: CPT, 1999. 134p.
- Tivelli, S.W.; Purquerio, L.F.V. Repolho. In: Fahl, J.I.; Camargo, M. B. P. de; Pizzinatto, M. A.; Betti, J. A.; Melo, A. M. T. de; DeMaria, I. C.; Furlani, A. M. C. (Eds.). Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. 6.ed. Campinas: Instituto Agronômico Campinas, 1998. p.239-240. (Boletim Técnico, 200).
- Van Genuchten, M. Th. A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Riverside: USDA-ARS; US Salinity Laboratory, 1987. 221p. (Research Report).
- Willmott, C.J.; Robeson, S.M.; Matsuura, K. A refined index of model performance. International Journal of Climatology, v.32, n.13, p.2088-2094, 2012. <<http://dx.doi.org/10.1002/joc.2419>>