



Sistemas de drenagem agrícola. Parte I: Desenvolvimento do modelo e análise de sensibilidade¹



João C. F. Borges Júnior², Paulo A. Ferreira³, Fernando F. Pruski⁴ & Aziz G. da Silva Júnior⁵

¹ Parte da Dissertação apresentada à UFV, para obtenção do título de "Magister Scientiae"

² DEAg/UFV, CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: jcborges@alunos.ufv.br (Foto)

³ UFV. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: pafonso@mail.ufv.br

⁴ UFV. Fone: (31) 3899-2734. E-mail: ffpruski@mail.ufv.br

⁵ UFV. Fone: (31) 3899-2215. E-mail: aziz@mail.ufv.br

Protocolo 023 - 21/2/2001

Resumo: Este trabalho contempla o desenvolvimento de um modelo computacional, visando suprir as principais lacunas em relação aos modelos existentes, e realizar análise de sensibilidade, objetivando verificar o efeito dos parâmetros de entrada sobre os resultados obtidos pela aplicação do modelo. O modelo contabiliza diariamente os principais componentes do balanço hídrico em um volume de controle de base unitária e altura igual à distância entre a superfície do solo e a camada impermeável, situado a meia distância entre dois drenos paralelos, à mesma profundidade simulando, assim, a movimentação do lençol freático. O modelo utiliza funções de produção que consideram o estresse causado por excesso e por falta de água na zona radicular, realiza análise econômica para diversas configurações do sistema de drenagem determinando-se, então, o espaçamento econômico entre drenos, além de informar sobre a viabilidade econômica do empreendimento. Com a análise de sensibilidade, verificou-se que os parâmetros profundidade média dos drenos, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, porosidade drenável, parâmetros climáticos, coeficiente CN e custo de instalação dos drenos subterrâneos, exercem maior influência no cálculo do espaçamento econômico entre drenos.

Palavras-chave: drenagem agrícola, modelo de simulação, análise econômica

Agricultural drainage systems. Part I: Model development and sensitivity analysis

Abstract: This study contemplates the development of a computational model seeking to fill the principal shortcomings of the existing models, and it also accomplishes a sensitivity analysis aiming to verify the effect of the input parameters on the results obtained by application of the model. The model accounts daily for the main components of the water balance in a controlled volume at half distance between two parallel drains on unitary base and a height equal to the distance between the soil surface and the soil impermeable layer, simulating the movement of the water table. Using the production functions that consider the stress caused by excess and lack of water in the root zone, this model accomplishes the economic analysis for several configurations of the drainage system, allowing for the determination of the economic spacing among drains besides informing about the economic viability of the enterprise. By sensitivity analysis it was verified that the parameters mean drain depth, horizontal soil saturated hydraulic conductivity, drainable porosity, climatic parameters, CN coefficient and the cost of the underground drain installation have a great influence on calculation of the economic drain spacing.

Key words: agricultural drainage, simulation model, economic analysis

INTRODUÇÃO

O objetivo da drenagem agrícola consiste em criar um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo (Ferreira, 2001). A drenagem agrícola possibilita aumentar o número anual de dias favoráveis às operações agrícolas mecanizadas, além de proporcionar ambiente adequado ao desenvolvimento das

raízes das culturas. Por outro lado, a drenagem excessiva é indesejável, pois reduz a quantidade de água disponível no solo para a cultura e intensifica a lixiviação de nutrientes fertilizantes, que irão poluir o lençol freático e os cursos d'água, além de aumentar o investimento por unidade de área. Em alguns casos, o controle do lençol freático ou a sub-irrigação podem ser utilizados durante o cultivo para suprir a quantidade de água necessária ao desenvolvimento da cultura e para prevenir a drenagem excessiva (Skaggs, 1981).

Ao se delinear um sistema integrado de manejo de água-solo-planta, deve-se considerar as propriedades físico-químicas do solo, a topografia, o clima, a cultura e os requerimentos de trafecabilidade. A metodologia a ser utilizada para projetar e analisar sistemas de manejo de água-solo-planta, deve permitir identificar-se seqüências de condições climáticas que podem ser críticas para a produção das culturas, além de descrever o desempenho do sistema durante certo período (Skaggs, 1981).

Durnford et al. (1984) enfatizam que um sistema de drenagem otimizado pode ser definido como aquele que maximize as diferenças entre os valores obtidos pelo incremento na produção, atribuído à implantação do sistema, e o custo desta implantação. Segundo esta conceituação, a otimização de projetos de drenagem envolve dois aspectos distintos, em que o primeiro se refere às conseqüências físicas da instalação dos drenos e à estimativa dos impactos da drenagem artificial nas inter-relações solo-água-planta e, conseqüentemente, na produtividade da cultura, enquanto o segundo aspecto é econômico, isto é, a avaliação do custo da drenagem e do retorno propiciado pelo incremento na produtividade.

Modelos baseados nas teorias de drenagem agrícola foram desenvolvidos com o objetivo de simular a movimentação do lençol freático e os escoamentos subterrâneo e superficial, em função de parâmetros climáticos, de características do solo e da geometria dos sistemas de drenagem.

Os modelos que utilizam dados climáticos como parâmetros de entrada permitem a simulação da flutuação do lençol freático durante vários anos. Esses resultados podem ser combinados com aqueles de resposta das culturas à movimentação do lençol, quando se quer determinar a média de danos anuais associados a um sistema. Diferentes profundidades e espaçamentos entre drenos propiciam variados graus de flutuação do lençol, podendo a média de danos anuais também variar. Deste modo, devem ser calculados os benefícios proporcionados por diferentes combinações de espaçamento e profundidade de drenos (Wiser et al., 1974).

Estudos de sensibilidade permitem verificar se um modelo produz resultados lógicos em função de alterações nos parâmetros de entrada. Resultados desses estudos fornecem informações sobre o comportamento do modelo e, também, sobre falhas na metodologia utilizada no modelo e na aplicabilidade do modelo, a diferentes cenários e escalas (Gowda et al., 1999).

Os objetivos deste trabalho foram: (a) desenvolver um modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola, visando suprir as lacunas em relação aos modelos existentes, notoriamente com relação à disponibilidade, no Brasil, de informações para alimentação dos modelos, e à facilidade de comunicação com o usuário; e (b) determinar os efeitos dos dados de entrada sobre os resultados gerados pela aplicação do modelo, empregando análise de sensibilidade.

MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolvimento do modelo

O aplicativo Delphi 3 foi utilizado no desenvolvimento do modelo denominado PRODREN, tendo em vista o desempenho de processamento e a interface gráfica. Simula a posição do

lençol freático contabilizando diariamente os principais componentes do balanço hídrico em um volume de controle de base unitária e altura igual à profundidade da camada impermeável, situado a meia distância entre dois drenos paralelos, instalados à mesma profundidade. Os componentes do balanço hídrico considerados, foram: precipitação, escoamento superficial, infiltração, armazenamento de água na zona radicular, percolação através da base da zona radicular, fluxo ascendente proveniente do lençol freático para a zona radicular, evapotranspiração, "seepage" e drenagem. Esses componentes estão esquematizados na Figura 1.

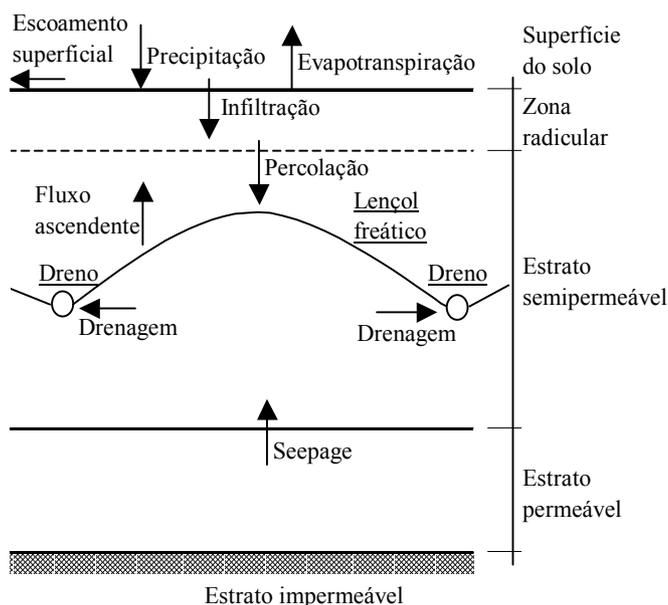


Figura 1. Componentes do balanço hídrico considerados no modelo

Como dados de entrada, o modelo necessita de séries históricas de dados diários pluviométricos e de evapotranspiração potencial da cultura, parâmetros físico-hídricos do solo, parâmetros da cultura, parâmetros econômicos e dados relativos à geometria do sistema de drenagem.

O PRODREN é um modelo iterativo, composto das etapas apresentadas, resumidamente, a seguir.

Determinação da fração da precipitação diária que infiltra e da fração que esco superficialmente: Para determinação da lâmina que esco superficialmente é utilizado o método do Número da Curva, desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS, 1972) vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA). Considera-se que infiltra a parcela da precipitação não-convertida em escoamento superficial.

Simulação da posição diária do lençol freático: Para se calcular a recarga do lençol freático no dia "y", na primeira simulação utiliza-se o valor da parcela de precipitação que infiltra, calculada na etapa A, acrescido da lâmina de "seepage" (escoamento devido à pressão artesiana) se esta ocorrer, ou seja:

$$rec_y = pinf_y + see_y \quad (1)$$

em que:

rec_y - recarga do lençol freático no dia "y", mm

$pinf_y$ - precipitação que infiltra no dia “y”, mm
 see_y - lâmina de “seepage” no dia “y”, mm

O PRODREN utiliza a equação de recarga intermitente de Kraijenhoff van de Leur – Maasland para estimar a altura do lençol freático devida a uma percolação constante (Pizarro, 1978), dada a seguir:

$$hlf_t = \frac{4rec}{\pi\mu_d} j \sum_{ni=1,-3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{ni^3} \left(\exp\left(\frac{ni^2}{j} b\right) - 1 \right) \exp\left(-\frac{ni^2}{j} t\right) \quad (2)$$

em que:

hlf_t - altura do lençol freático sobre o plano que contém os drenos, no instante t, em resposta a uma recarga, m
 ni - número de ordem da série
 exp - número neperiano, aproximadamente igual a 2,718282
 rec - recarga efetiva de intensidade constante, m d⁻¹
 μ_d - porosidade drenável do solo, decimal (Ferreira, 2001)
 b - duração da recarga, d
 t - período de tempo contado desde o início da recarga, d
 j - fator de armazenamento, d, calculado por meio da expressão:

$$j = \frac{\mu_d L^2}{\pi^2 K_{ho} D} \quad (3)$$

em que:

L - espaçamento entre os drenos, m
 K_{ho} - condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, m d⁻¹ (Ferreira, 2001)

$$D = deq + hm \quad (4)$$

em que:

deq - espessura do estrato equivalente de Hooghoudt, m
 hm - altura média do lençol freático sobre o plano que passa pelos drenos no tempo b, m.

O valor de b utilizado é de um dia, correspondente ao tempo entre as leituras de dados pluviométricos, enquanto o valor de deq é calculado conforme o procedimento descrito por Ferreira (2001).

Realização do balanço hídrico na zona radicular e correção da parcela da precipitação que atinge o lençol freático: São calculados, para cada dia de número “y”, os seguintes valores: armazenamento diário de água na zona radicular (arm_y), fluxo vertical ascendente máximo diário (fa_{max}), evapotranspiração real diária (etr_y), evapotranspiração real diária oriunda da zona radicular ($etrz_y$), evapotranspiração real diária oriunda do lençol freático ($etlf_y$) e parcela de precipitação pluvial diária que atinge o lençol freático ($pinflf_y$).

A equação empregada para calcular o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, em qualquer posição abaixo da zona radicular, é a de Darcy-Buckingham, escrita na forma de diferenças finitas, conforme Skaggs (1981). Utilizando-se um

procedimento descrito por Duarte (1997) a relação entre a umidade e o potencial matricial de água no solo é determinada pelo modelo de van Genuchten (1980) e a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo é obtida utilizando-se o modelo de Mualem (1976).

A evapotranspiração real é calculada com base no teor de água da zona radicular, utilizando-se a equação proposta por Bernardo (1989) considerando-se, portanto, uma redução exponencial da evapotranspiração real com a redução da umidade do solo. Quando a evapotranspiração real, calculada em cada iteração, for menor ou igual ao fluxo ascendente máximo, a etr será considerada suprida integralmente pelo lençol freático, não ocorrendo decréscimo do conteúdo de água da zona radicular, devido à evapotranspiração; caso contrário, ou seja, sendo a etr maior que fa_{max} , a evapotranspiração real é considerada suprida pelo lençol freático e pela zona radicular, da seguinte forma: $etlf = fa_{max}$ e $etrz = etr - etlf$.

Retorno às etapas B e C, de forma iterativa: Na etapa B, da segunda iteração em diante, a recarga do lençol freático passa a ser calculada por meio da expressão:

$$rec_y = pinflf_y + see_y - etlf_y \quad (5)$$

Calcula-se novamente a altura diária do lençol freático (hlf_y) e, então, comparam-se os valores de hlf_y , etr_y e arm_y obtidos em duas iterações consecutivas. Caso a diferença absoluta entre os valores de hlf_y seja inferior a 0,001 m e as diferenças absolutas entre os valores de etr_y e arm_y sejam inferiores a 0,01 mm, o procedimento termina, e é iniciada a próxima etapa (E).

Cálculo dos parâmetros de avaliação de desempenho do sistema de drenagem: Parâmetros de desempenho utilizados em vários trabalhos relacionados a estudos dos efeitos do excesso ou da falta de água no solo sobre a produtividade das culturas, são: soma do excesso de água (SEW_{30}); número de dias secos (NDS); produtividade relativa em função do excesso de água no solo (YRW); produtividade relativa em função do déficit de água no solo (YRD) e produtividade relativa total (YT) (Hiler, 1969; Hardjoamidjojo et al., 1982; Chang et al., 1983; Carter et al., 1985; Fouss et al., 1987; Gayle et al., 1987; Skaggs, 1990; Vildoso, 1995; Duarte et al., 1998; Borges Júnior, 2000; entre outros). Em seguida, efetua-se a análise econômica, calculando-se o valor presente.

O valor presente pode ser definido como a diferença entre os benefícios e os custos, projetada para determinado ano de referência, calculado por meio da equação:

$$VP_x = \sum_{i=0}^{VEcon} \frac{(RA_x - CManT)}{(1 + TJuros)^i} - CImpl \quad (6)$$

em que:

VP_x - valor presente, considerando-se a RA_x , R\$ ha⁻¹
 $VEcon$ - vida econômica do projeto, anos
 RA_x - receita anual no ano “x”, R\$ ha⁻¹
 $CManT$ - custo de manutenção anual total, por hectare, R\$ ha⁻¹
 $Tjuros$ - taxa de juros anual, decimal
 $CImpl$ - custo de implantação do projeto, por hectare, R\$ ha⁻¹

As etapas descritas acima são esquematizadas no fluxograma (Figura 2).

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do modelo foi realizada variando-se cada parâmetro de entrada, individualmente, enquanto os outros parâmetros eram mantidos constantes. Esta análise visa determinar a necessidade de precisão de cada parâmetro de entrada.

Considerou-se a mesma base de dados utilizada por Duarte et al. (1998) para se realizar a análise de sensibilidade do modelo SIMDRENO, com o qual o PRODREN é comparado na Parte II deste trabalho. A cultura utilizada foi o milho semeado em 8 de outubro e colhido em 14 de fevereiro. Foram utilizadas séries de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial da região de Piracicaba, SP, para o período de 1974 a 1994, no total de 21 anos. O tipo de solo foi argiloso e a lâmina de “seepage” nula. A variação da profundidade efetiva do sistema radicular para a cultura do milho e os parâmetros de sensibilidade da cultura, ao excesso e ao déficit de água no solo, são citados por Skaggs (1990).

As Tabelas 1 a 4 apresentam os valores dos parâmetros de entrada utilizados nesta análise.

Tabela 1. Parâmetros físico-hídricos do solo utilizados na análise de sensibilidade do modelo

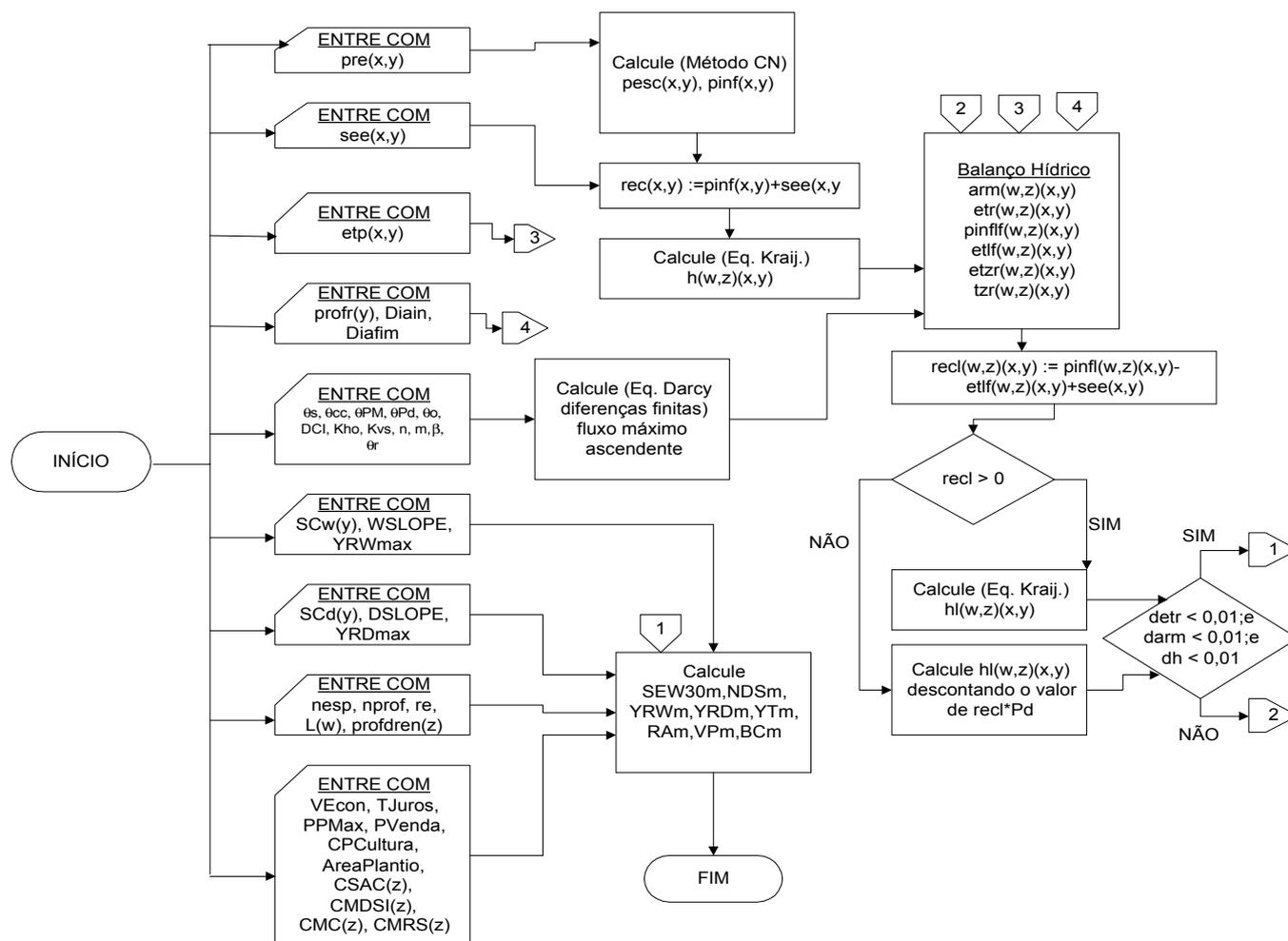
Parâmetro	Valor
Condutividade hidráulica horizontal do solo saturado	0,50 m d ⁻¹
Condutividade hidráulica vertical do solo saturado	0,25 m d ⁻¹
Porosidade drenável	0,07 m ³ m ⁻³
Umidade do solo saturado	0,64 m ³ m ⁻³
Umidade do solo na capacidade de campo	0,55 m ³ m ⁻³
Umidade do solo no ponto de murcha permanente	0,44 m ³ m ⁻³
Umidade do solo no dia inicial	0,58 m ³ m ⁻³
Posição do lençol freático acima do plano dos drenos no dia inicial	0,60 m
Profundidade do perfil (camada impermeável)	5 m
Coefficiente CN (Número da Curva)*	82

* Adimensional

Tabela 2. Parâmetros do modelo de Genuchten utilizados para estimativa do fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático

Parâmetro	Valor
Umidade residual	0,363 m ³ m ⁻³
M	0,1532
η	1,1809
β	0,0654 cm ⁻¹

M e η são parâmetros adimensionais



OBS.: Para significado dos símbolos consultar as Eqs. 1 a 6 no texto

Figura 2. Fluxograma do PRODREN

Tabela 3. Parâmetros geométricos do sistema de drenagem

Parâmetro	Valor
Profundidade dos drenos	1,20 m
Raio efetivo dos drenos*	0,05 m
Valores de espaçamento entre drenos considerados nas simulações	5 a 110 m, em intervalos de 1 m

* Duarte et al. (1998) utilizaram o valor 0,04 m

Tabela 4. Parâmetros de entrada utilizados na análise econômica

Parâmetro	Valor
Custo de instalação dos drenos subterrâneos	R\$ 5,00 m ⁻¹
Preço de venda do milho	R\$ 6,50 (60 kg) ⁻¹
Custo de produção	R\$ 600,00 ha ⁻¹
Custo de saneamento e abertura dos coletores	R\$ 350,00 ha ⁻¹
Custo anual de manutenção dos coletores	R\$ 10,50 ha ⁻¹
Vida útil do sistema de drenagem	25 anos
Taxa de juros anual	12 %
Custo anual de manutenção da rede de drenos subterrâneos	0,5 % do custo de instalação

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O PRODREN utiliza uma interface gráfica, apresentando um “menu”, com o qual são acessados os formulários para entrada de dados e de apresentação dos resultados. A entrada de dados é feita por meio de leitura de arquivos, preferencialmente, ou digitação. Os resultados são apresentados em forma de tabelas e gráficos, permitindo verificar-se o desempenho das diferentes configurações de sistemas de drenagem avaliadas, sendo indicada aquela que propicie o maior retorno econômico. Permite, também, determinar se o empreendimento é ou não viável economicamente.

Análise de sensibilidade

Os resultados da análise de sensibilidade são apresentados na Figura 3.

Na Figura 3A pode-se observar os efeitos da variação dos parâmetros de entrada, relativos à geometria do sistema de drenagem e às características físico-hídricas do solo, sobre os resultados das simulações, obtidos com a aplicação do modelo PRODREN. O modelo mostrou-se insensível aos parâmetros raio efetivo dos drenos e condutividade hidráulica vertical do solo saturado. Verifica-se, ainda, que maiores efeitos sobre o espaçamento econômico foram produzidos pelas profundidade dos drenos, porosidade drenável e condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, sendo estes, portanto, os parâmetros que necessitam de maior precisão, ao serem determinados. Os efeitos das variações positivas desses parâmetros foram semelhantes, cuja consequência foi o aumento do espaçamento econômico entre drenos; já para variações positivas do parâmetro profundidade do perfil, o modelo mostrou ter pouca ou nenhuma sensibilidade, indicando a menor importância na determinação precisa de profundidades da camada impermeável superiores a 5 m, quando a profundidade dos drenos é de cerca de 1,2 m. Para variações negativas desses

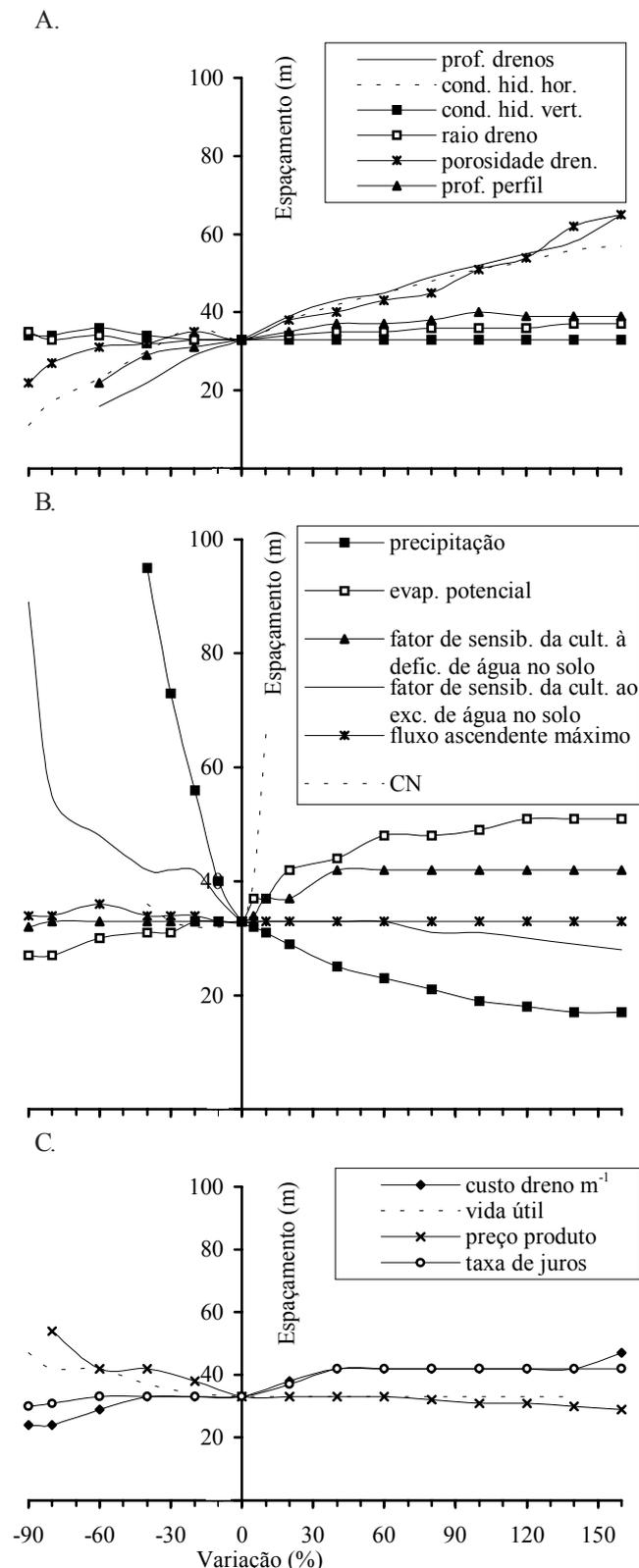


Figura 3. Sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada

parâmetros de entrada, observa-se que o modelo mostrou-se mais sensível, em ordem, às variações nos parâmetros profundidade dos drenos, profundidade do perfil, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado e porosidade drenável.

Na Figura 3B observa-se a sensibilidade do modelo aos seguintes parâmetros de entrada: precipitação diária, evapotranspiração potencial diária, fator de sensibilidade da

cultura ao déficit de água no solo, fator de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo, fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático e coeficiente CN (método do Número da Curva, utilizado para estimativa do escoamento superficial). O modelo mostrou-se insensível ao parâmetro fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático.

Para variações positivas dos parâmetros coeficiente CN, evapotranspiração potencial e fator de sensibilidade da cultura ao déficit de água no solo, verificou-se aumento do espaçamento econômico calculado, entre drenos. Destaca-se a grande influência observada com a variação do coeficiente CN, indicando a necessidade da implementação de estudos voltados para a aplicabilidade desta metodologia no Brasil. Ressalta-se a importância da estimativa adequada do escoamento superficial, cuja superestimativa implica numa subestimativa do dimensionamento do sistema de drenagem subterrânea, ou seja, superestimativa do espaçamento entre drenos, o que pode acarretar redução da produtividade, devido ao excesso de água no solo e, conseqüentemente, redução do retorno econômico esperado. Variações positivas dos parâmetros precipitação e fator de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo, implicaram em redução do espaçamento econômico entre drenos, obtido pela aplicação do modelo, conforme esperado. O modelo foi altamente sensível à precipitação, enquanto à sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo ele se mostrou insensível a variações até 60 %, verificando-se pequena sensibilidade para maiores variações.

Variações negativas dos valores de precipitação acarretaram grande superestimativa do espaçamento econômico entre drenos. Em menor escala, observou-se este efeito também para o fator de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo, o que evidencia a necessidade de pesquisas com o objetivo de determinação adequada deste fator, para diferentes variedades de culturas. Variações negativas de evapotranspiração potencial acarretaram pequena subestimativa do espaçamento econômico entre drenos. O modelo não mostrou sensibilidade a variações negativas do fator de sensibilidade da cultura ao déficit de água no solo e do coeficiente CN. Para variações deste parâmetro, inferiores a 40% negativo, não foram obtidos resultados lógicos.

A Figura 3C mostra a sensibilidade do modelo aos parâmetros utilizados na análise econômica. Conforme esperado, variações positivas do custo de instalação dos drenos subterrâneos e da taxa de juros anual acarretaram aumento do espaçamento econômico entre drenos, mas se observou que variações a partir de 40% no valor da taxa de juros anual, o que equivale a 16,8%, não implicaram em variação do espaçamento econômico entre drenos, estabilizado em 42 m. Variações positivas do preço do produto, em até 60 %, não implicaram em redução do espaçamento entre drenos. Para variações superiores verificou-se redução do espaçamento econômico entre drenos. Variações negativas do custo de instalação dos drenos subterrâneos implicaram em redução do espaçamento econômico entre drenos para valores de variação inferiores a 40% negativo; o mesmo ocorreu para variações da taxa de juros anual inferiores a 60% negativo, porém sensivelmente menos acentuada. Variações negativas do preço do produto e da vida útil do projeto acarretaram aumento do espaçamento econômico entre drenos. Este efeito foi mais acentuado para o preço do

produto, indicando a necessidade de uma estimativa criteriosa deste parâmetro.

Ressalta-se que a sensibilidade do modelo aos vários parâmetros de entrada avaliados pode sofrer alterações, conforme a base de dados utilizada. Observou-se que, para a base de dados utilizada nesta análise, a cultura ficou sujeita mais intensamente ao estresse, devido ao déficit de água no solo.

O PRODREN pode ser obtido através dos endereços: pafonso@mail.ufr.br e jcborges@alunos.ufr.br.

CONCLUSÕES

1. O modelo computacional PRODREN, mostrou-se potente a suprir as principais lacunas em relação aos modelos existentes, utilizando-se dados de entrada normalmente disponíveis no país, sendo dotado de uma interface gráfica que facilita a comunicação com o usuário.

2. A análise de sensibilidade indicou que os parâmetros profundidade média dos drenos, condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, porosidade drenável, parâmetros climáticos, coeficiente CN e custo de instalação dos drenos subterrâneos, exercem maior influência no cálculo do espaçamento econômico entre drenos.

3. O modelo mostrou-se praticamente insensível a variações nos valores dos parâmetros raio efetivo dos drenos, condutividade hidráulica vertical do solo saturado e fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático.

LITERATURA CITADA

- Bernardo, S. Manual de irrigação. 5.ed. Viçosa, UFV, 1989, 596p.
- Borges Jr., J.C.F. Modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola. Viçosa: UFV, 2000. 106p. Tese Doutorado.
- Carter, C.E.; Irvine, J.E.; McDaniel, V.; Dunckelman, J. Yield response of sugarcane to stalk density and subsurface drainage treatments. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.28, n.1, p.172-178, 1985.
- Chang, A.C.; Skaggs, R.W.; Hermsmeier, L.F.; Johnston, W.R. Evaluation of a water management model for irrigated agriculture. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.26, n.2, p.412-418, 1983.
- Duarte, S.N. Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos. Viçosa: UFV, 1997. 143p. Tese Doutorado.
- Duarte, S.N.; Ferreira, P.A.; Martinez, M.A.; Pruski, F.F. Modelo para avaliação e desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos. Parte I: desenvolvimento e análise de sensibilidade. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.18, n.2, p.19-31, 1998.
- Durnford, D.S.; Podmore, T.H.; Richardson, E.V. Optimal drain design for arid, irrigated areas. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.27, n.4, p.1100-1105, 1984.
- Ferreira, P.A. Drenagem. In: Curso de engenharia de irrigação. Módulo XI. Brasília: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. 2001. 167p.
- Fouss, J.L.; Bengtson, R.L.; Carter, C.E. Simulating subsurface drainage in the lower Mississippi Valley with DRAINMOD. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.30, n.6, p.1679-1688, 1987.

- Gayle, G.A.; Skaags, R.W.; Carter, C.E. Effects of excessive soil water conditions on sugarcane yields. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.30, n.4, p.993-997, 1987.
- Gowda, P.; Ward, A.; White, J.L.; Desmond, E. The sensitivity of ADAPT model predictions of streamflows to parameters used to define hydrologic response units. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.42, n.2, p.381-389, 1999.
- Hardjoamidjojo, S.; Skaggs, R.W.; Schwab, G.O. Corn yield response to excessive soil water conditions. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.25, n.3, p.922-927, 1982.
- Hiler, E.A. Quantitative evaluation of crop-drainage requirements. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.12, n.4, p.499-505, 1969.
- Mualem, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, D.C., v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- Pizarro, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madrid: Agrícola Española, 1978. 521p.
- SCS - Soil Conservation Service, USDA. National engineering handbook. IV. Hydrology. Washington, D.C.: USDA. 1972. n.p.
- Skaggs, R.W. DRAINMOD - Reference report: Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Raleigh: USDA-SCS, 1981. 329p.
- Skaggs, R.W., DRAINMOD - user's manual. Raleigh: North Carolina State University, 1990. 101p.
- van Genuchten, M.T. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society America Journal, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.
- Vildoso, T.A. Relação entre a produção relativa e o índice diário de estresse para a cultura da cenoura (*Daucus carota*, L.). Viçosa: UFV, 1995. 43p. Dissertação Mestrado
- Wiser, E.H.; Ward, R.C.; Link, D.A. Optimized design of a subsurface drainage system. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.15, n.1, p.175-182, 1974.