



# Sistemas de drenagem agrícola. Parte II: Comparação entre o modelo desenvolvido e outras metodologias



Paulo A. Ferreira<sup>1</sup>, João C. F. Borges Júnior<sup>2</sup>, Aziz G. da Silva Júnior<sup>3</sup> & Fernando F. Pruski<sup>4</sup>

<sup>1</sup> DEA/UFV, CEP 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1911, Fax: (31) 3899-2735. E-mail: pafonso@mail.ufv.br (Foto)

<sup>2</sup> UFV. Fone: (31) 3899-1911. E-mail: jcborges@alunos.ufv.br

<sup>3</sup> UFV. Fone: (31) 3899-2215. E-mail: aziz@mail.ufv.br

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

Protocolo 024 - 21/2/2001

**Resumo:** Com este trabalho, objetivou-se comparar os resultados obtidos com o modelo desenvolvido, PRODREN, com aqueles obtidos com os modelos DRAINMOD, amplamente testado nos Estados Unidos, e SIMDRENO e, também, com metodologias tradicionalmente usadas no dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola em regiões de clima úmido e sub-úmido. Realizaram-se simulações de rebaixamento do lençol freático, empregando-se os três modelos. Os resultados do dimensionamento de sistemas de drenagem para a cultura do milho, obtidos com os três modelos e também com a aplicação das metodologias tradicionais, foram comparados; tanto os resultados das simulações de movimentação do lençol freático quanto os dimensionamentos econômicos de sistemas de drenagem realizados com o PRODREN, foram semelhantes aos obtidos pelo DRAINMOD e SIMDRENO. Os espaçamentos entre drenos obtidos pela aplicação do PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD, baseados no balanço hídrico e em análises econômicas, foram consideravelmente maiores que aqueles resultantes do emprego de metodologias tradicionais.

**Palavras-chave:** modelo de simulação, lençol freático, análise econômica

## Agricultural drainage systems. Part II: Comparison between the developed model and other methodologies

**Abstract:** This study aimed at comparing the results obtained from the developed model, PRODREN, with those obtained from the DRAINMOD model thoroughly tested in the United States, and with the SIMDRENO model, as well as with methodologies traditionally used in dimensioning the agricultural drainage systems in areas of humid and sub-humid climates. Simulations for lowering the water table were accomplished by using these three models. The results from the drainage system design for maize crop, which was obtained by using the three models as well as by application of the traditional methodologies, were compared. The results from simulations of the water table and the economic design of the drainage systems accomplished with PRODREN were similar to those obtained by DRAINMOD and SIMDRENO models. The spacing among drains obtained by application of the PRODREN, SIMDRENO and DRAINMOD models based on water balance and economic analysis were considerably larger than those resulting from the employment of traditional methodologies.

**Key words:** simulation model, water table, economic analysis

## INTRODUÇÃO

A partir da década de 1980, os avanços na informática permitiram o desenvolvimento de modelos computacionais voltados para a agricultura e aqueles com base nas teorias de drenagem surgiram como ferramentas de simulação do desempenho de sistemas de drenagem, considerando-se os vários fatores que interferem neste desempenho, isto é, características do solo, cultura, clima, topografia e fatores econômicos.

Em 1978, foi apresentado um modelo computacional de simulação denominado DRAINMOD, desenvolvido na Universidade do Estado da Carolina do Norte - EUA, com o objetivo de projetar e avaliar sistemas de drenagem relativos ao rebaixamento do lençol freático. O modelo caracteriza a resposta do regime de água no solo a várias combinações de manejo de águas superficiais e subterrâneas e estima a movimentação do lençol freático e a variação da umidade na região não-saturada em resposta a dados de precipitação, evapotranspiração, intensidade de drenagem superficial e subterrânea e ao uso de práticas de

controle do lençol freático ou sub-irrigação. Deste modo, um sistema otimizado pode ser projetado em base probabilística, conforme Young & Ligon (1972) e Wiser et al. (1974).

Skaggs (1990) afirma que o DRAINMOD tem sido amplamente utilizado nas regiões úmidas dos Estados Unidos, tendo sua viabilidade já comprovada para vários tipos de solo, culturas e condições climáticas. Nas regiões brasileiras de clima úmido e sub-úmido, a utilização do DRAINMOD apresenta, como limitação principal, o fato do modelo exigir, dentre os parâmetros de entrada, valores horários de precipitação.

O modelo desenvolvido por Duarte (1997) denominado SIMDRENO, simula a posição do lençol freático e a umidade do solo na zona radicular, utilizando séries históricas de dados de precipitação, evapotranspiração potencial, parâmetros físico-hídricos do solo, parâmetros da cultura e dados sobre a geometria do sistema de drenagem. O modelo estima o escoamento superficial, empregando o método do Número da Curva (SCS, 1972) e calcula a posição do lençol freático por meio de equações que consideram a recarga intermitente do lençol e estima a umidade do solo na zona radicular, com base num balanço hídrico. O modelo permite, ainda, a escolha de uma das três equações de recarga intermitente mais citadas na literatura, isto é, as equações de Schilfgaard, de Kraijenhoff van de Leur e de Zeeuw e Hellinga. Com base em valores experimentais que expressam a sensibilidade das culturas ao excesso e à falta de água no solo, o modelo estima, anualmente, a produtividade relativa esperada, realiza uma análise econômica e informa qual sistema de drenagem é mais viável para cada situação. Conforme Duarte (1997) fazem-se necessárias algumas modificações visando à melhoria do desempenho e da interface do SIMDRENO.

Os objetivos deste trabalho foram: (a) comparar os resultados de simulações de rebaixamento do lençol freático, efetuadas com o modelo desenvolvido, denominado PRODREN, aos obtidos com o DRAINMOD e o SIMDRENO; e (b) comparar os resultados de dimensionamento de sistemas de drenagem efetuados com o PRODREN, em relação aos resultados obtidos com os modelos DRAINMOD e SIMDRENO e com as metodologias tradicionais de dimensionamento.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Rebaixamentos do lençol freático simulados pelos modelos

As simulações compreenderam um período de 50 d de rebaixamento do lençol freático sendo a profundidade inicial considerada igual a zero. Um solo argiloso, cujos parâmetros físico-hídricos são apresentados na Tabela 1, foi utilizado como referência.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros necessários ao modelo de van Genuchten (1980) empregado para se estimar o fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático.

Utilizou-se a profundidade dos drenos de 1,2 m e os espaçamentos entre drenos laterais de 10, 30 e 50 m. A evapotranspiração potencial (ETp) empregada nas simulações, foi 5 mm d<sup>-1</sup>. Considerou-se a inexistência de chuvas durante o período e a profundidade do sistema radicular utilizada foi de 0,30 m.

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 <sup>-1</sup>              |
| Condutividade hidráulica vertical do solo saturado                  | 0,25 m d <sup>-1</sup>              |
| Porosidade drenável   | 0,07 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> |
| Umidade do solo saturado  | 0,64 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> |
| Umidade do solo na capacidade de campo                              | 0,55 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> |
| Umidade do solo no ponto de murcha permanente                       | 0,44 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> |
| Umidade do solo no dia inicial                                      | 0,58 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> |
| 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                                  |

Tabela 2. Parâmetros do modelo de van Genuchten (1980)

| Textura  | $\theta_r$<br>(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | M      | $\eta$ | $\beta$<br>(cm <sup>-1</sup> ) |
|----------|---|--------|--------|--------------------------------|
| Argiloso | 0,363   | 0,1532 | 1,1809 | 0,0654                         |

Obs.: os parâmetros M e  $\eta$  são adimensionais

Os resultados das simulações feitas pelo SIMDRENO e pelo DRAINMOD foram aqueles obtidos por Duarte (1997). Os resultados relativos ao SIMDRENO foram calculados empregando-se a equação de Kraijenhoff van de Leur - Maasland (Pizarro, 1985).

### Dimensionamento de sistemas de drenagem efetuados com os modelos e com as metodologias tradicionais

Foram comparados os resultados de dimensionamento de sistemas de drenagem, ou seja, espaçamento entre drenos laterais, obtidos com a aplicação dos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD, e das metodologias tradicionais, que utilizam os critérios preconizados por Pizarro (1985) e Cruciani (1987). As simulações foram realizadas para situações em que se considerou ou não o escoamento superficial, para a região de Piracicaba, SP.

Na metodologia proposta por Pizarro (1985) a equação de Glover-Dumm é utilizada para calcular a altura do lençol freático em relação ao plano que passa pelos drenos. Para cada tipo de cultura, são estabelecidas profundidades mínimas nas quais o lençol freático deve estar em um, dois e três dias, transcorridos após uma chuva de um dia com probabilidade de ser igualada ou superada, em média, cinco vezes ao ano. Esta altura de chuva para a região de Piracicaba é de 45,9 mm (Duarte, 1997). Neste critério, não é considerado o escoamento superficial, ou seja, considera-se que toda precipitação se infiltra no solo.

O critério proposto por Cruciani (1987) também utiliza a equação de Glover-Dumm. Conforme o tipo de cultura, são estabelecidas taxas de rebaixamento do lençol freático após uma chuva de 24 h, com período de retorno igual a cinco anos. Para a região de Piracicaba, essa precipitação é 106 mm (Duarte, 1997). Para se calcular o escoamento superficial, o autor sugere a utilização do coeficiente "C", oriundo da fórmula racional. Foram empregados valores de "C" iguais a 0,4, 0,5 e 0,6, para os solos franco-argiloso, argiloso e franco-argilo-siltoso, respectivamente.

A base de dados utilizadas nas simulações realizadas com os três modelos foi:

a) Clima: foram utilizadas séries de dados diários de precipitação e de evapotranspiração potencial para a cultura do milho, da região de Piracicaba, para o período de 1974 a 1994, num total de 21 anos.

b) Seepage (escoamento decorrente da pressão artesiana): a lâmina de “seepage” foi considerada nula.

c) Solo: foram empregados três tipos de solo, com características distintas. Relativamente à textura, classificam-se em:

- solo 1: franco-argiloso
- solo 2: argiloso
- solo 3: franco-argilo-siltoso

A Tabela 3 apresenta os teores volumétricos de água relativos à diferentes estádios hídricos.

Tabela 3. Teores volumétricos de água ( $m^3 m^{-3}$ ) relativos à saturação ( $\theta_s$ ), capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PM}$ ) e em equilíbrio com o potencial matricial de -0,6 m.c.a. ( $\theta_{Pd}$ ) para diferentes solos

| Solo                  | Teor de Água |               |               |               |
|-----------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
|                       | $\theta_s$   | $\theta_{CC}$ | $\theta_{PM}$ | $\theta_{Pd}$ |
| Franco-argiloso       | 0,572        | 0,372         | 0,189         | 0,434         |
| Argiloso              | 0,645        | 0,546         | 0,444         | 0,577         |
| Franco-argilo-siltoso | 0,494        | 0,427         | 0,329         | 0,443         |

Na Tabela 4 estão relacionadas as condutividades hidráulicas horizontais e verticais do solo saturado,  $K_{ho}$  e  $K_{vs}$ , respectivamente.

Tabela 4. Condutividades hidráulicas horizontais ( $K_{ho}$ ) e verticais ( $K_{vs}$ ) do solo saturado

| Condutividade Hidráulica | $K_{ho}$ ( $m d^{-1}$ ) | $K_{vs}$ ( $m d^{-1}$ ) |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Franco-argiloso          | 1,00                    | 0,50                    |
| Argiloso                 | 0,50                    | 0,25                    |
| Franco-argilo-siltoso    | 0,10                    | 0,05                    |

A Tabela 5 apresenta os parâmetros necessários ao modelo de van Genuchten (1980), empregado para se estimar o fluxo ascendente máximo oriundo do lençol freático.

Tabela 5. Parâmetros do modelo de van Genuchten

| Textura               | $\theta_s$     | $\theta_r$ | M      | $\eta$ | $\beta$     |
|-----------------------|----------------|------------|--------|--------|-------------|
|                       | $(m^3 m^{-3})$ |            |        |        | $(cm^{-1})$ |
| Franco-argiloso       | 0,572          | 0,112      | 0,2117 | 1,2685 | 0,0538      |
| Argiloso              | 0,645          | 0,363      | 0,1532 | 1,1809 | 0,0654      |
| Franco-argilo-siltoso | 0,494          | 0,073      | 0,0633 | 1,0676 | 0,1010      |

Obs.: os parâmetros M e  $\eta$  são adimensionais

A profundidade da camada impermeável ( $D_{CI}$ ) foi 5 m.

O valor da umidade inicial do solo ( $\theta_i$ ), isto é, a umidade do solo no início da simulação, foi tomado como aquele correspondente à tensão de 0,6 m.c.a. para cada solo, ou seja, igualou-se  $\theta_i$  a  $\theta_{Pd}$ . A altura inicial do lençol freático em relação ao plano que contém os drenos ( $h_{f0}$ ) foi considerada igual a 0,6 m. Ressalta-se a influência praticamente nula dos parâmetros

$\theta_i$  e altura inicial do lençol freático, sobre os resultados, devido à extensão do período em que a simulação foi feita.

d) Escoamento superficial: as análises foram realizadas para situações em que se considerou ou não o escoamento superficial. Como o PRODREN e o SIMDRENO não consideram o efeito da variação do espaçamento entre os drenos sobre o escoamento superficial, utilizou-se o procedimento proposto por Duarte (1997) que empregou resultados de simulações executadas pelo DRAINMOD, considerando uma lâmina máxima de armazenamento superficial de 1,2 cm, para estimar as lâminas de escoamento superficial para 20 espaçamentos propostos. Calculou-se então, para cada tipo de solo, o valor do coeficiente CN (Número da Curva) que gerava lâminas médias anuais de escoamento superficial mais próximas daquelas obtidas pelo DRAINMOD. Este procedimento forneceu valores de CN iguais a 66, 82 e 93, para os solos 1, 2 e 3, respectivamente.

e) Cultura: considerou-se a cultura de milho, com semeadura no dia 8 de outubro e colheita no dia 14 de fevereiro, totalizando um ciclo de 130 d. Os dados de variação da profundidade efetiva do sistema radicular e os coeficientes de estresse da cultura foram os mesmos utilizados por Duarte (1998 a).

f) Sistemas de drenagem: as análises foram efetuadas para sistemas de drenagem com drenos laterais cobertos, com as seguintes dimensões:

- espaçamentos entre drenos de 5 a 100 m, com incrementos de 5 m
- profundidade de drenos de 1,2 m
- diâmetro efetivo de drenos de 0,1 m

g) Dados econômicos: o cálculo do valor presente foi efetuado utilizando-se os dados apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Parâmetros de entrada utilizados no cálculo do valor presente

| 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

### Rebaixamentos do lençol freático simulados pelos modelos

Os resultados de rebaixamento do lençol freático obtidos pela aplicação dos modelos, são apresentados na Figura 1, a qual mostra uma subestimativa das profundidades do lençol freático pelo SIMDRENO, em relação às estimadas pelo PRODREN e pelo DRAINMOD, para espaçamentos de 30 e 50 m. Este comportamento ocorre pelo fato do PRODREN contabilizar o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, mesmo quando não ocorre contribuição de chuva ou seepage, ao contrário do SIMDRENO. Ressalta-se que os dois modelos utilizam a equação de Kraijenhoff van de Leur - Maasland, para calcular o rebaixamento do lençol devido à drenagem.

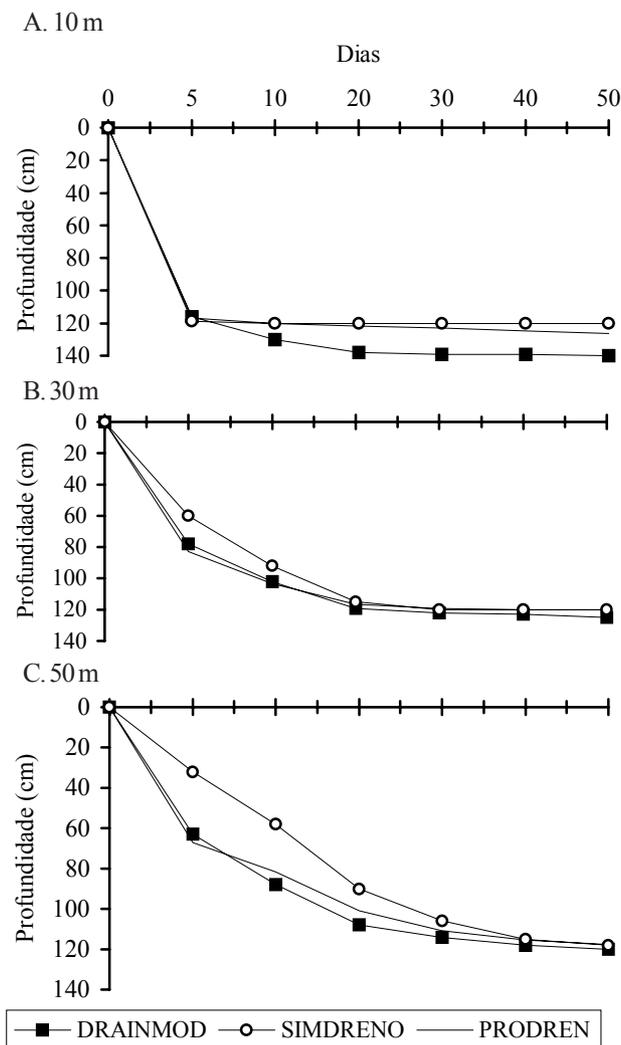


Figura 1. Simulações de rebaixamento do lençol freático pelo DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN, para profundidade de dreno de 1,2 m e diferentes espaçamentos entre os drenos: (A) 10 m, (B) 30 m e (C) 50 m. Coordenada vertical positiva para baixo

Na Figura 1A observa-se que, nas simulações realizadas para o espaçamento de 10 m, as taxas de rebaixamento do lençol freático, obtidas com os três modelos, foram semelhantes para os primeiros cinco dias; a partir daí, o DRAINMOD calculou profundidades do lençol freático maiores que as calculadas pelo PRODREN e SIMDRENO. Duarte (1998 b) comparou os resultados de simulações realizadas pelo SIMDRENO e pelo DRAINMOD com medidas de campo, tendo observado tendência do DRAINMOD em superestimar as profundidades do lençol freático durante os períodos de estiagem. Uma explicação para este fato, dada pelo autor, é que o DRAINMOD contabiliza a posição do lençol freático por meio da soma da espessura da “zona seca” (região da zona radicular onde a umidade atingiu o limite mínimo de absorção de água, isto é, o ponto de murcha permanente) com a espessura da “zona úmida” (região compreendida entre a base da “zona seca” e o lençol freático). Desta forma, o DRAINMOD considera um rebaixamento do lençol freático à medida que a água é extraída da zona radicular, mesmo que este não esteja em queda, devido ao aumento da profundidade da “zona seca”. Conforme Rogers

(1985) este fato acarreta superestimativa da profundidade do lençol freático pelo DRAINMOD, notoriamente nos períodos em que o lençol se encontra abaixo do nível dos drenos.

Observando-se a Figura 1A, verifica-se que a profundidade limite do lençol freático, estimada pelo SIMDRENO, é igual à profundidade dos drenos, o que ocorre em virtude desse modelo não considerar o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, quando não ocorre contribuição de precipitação ou seepage.

Pode-se observar, nas Figuras 1B e 1C, que os resultados obtidos com o modelo PRODREN se aproximaram aos obtidos pelo DRAINMOD. Esses dois modelos geraram maiores profundidades do lençol freático em relação aos valores obtidos com o SIMDRENO, mas se verifica que, a partir de 20 d para o espaçamento entre drenos de 30 m (Figura 1B) e de 30 d para o espaçamento de 50 m (Figura 1C) os três modelos geraram valores de profundidade do lençol freático bem próximo.

Considerando-se a aproximação dos resultados das simulações efetuadas pelos modelos DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN, conforme a Figura 1, espera-se que o PRODREN tenha bom desempenho em testes de campo, tendo em vista os baixos valores de erro-padrão entre hidrógrafas de lençol freático medidas e simuladas pelos modelos DRAINMOD e SIMDRENO, citados na literatura. Chang et al. (1983), Fouss et al. (1987), Sabbagh et al. (1993) e Duarte (1997) obtiveram os seguintes valores de erro-padrão entre hidrógrafas de lençol freático medidas e simuladas pelo DRAINMOD: 0,060 a 0,240 m; 0,141 a 0,208 m; 0,070 a 0,269 m e 0,045 a 0,122 m, respectivamente. Para o SIMDRENO Duarte (1997) encontrou valores de erro-padrão variando de 0,041 a 0,104 m (utilizando a equação de Krayjenhoff van de Leur - Maasland).

#### Dimensionamento de sistemas de drenagem efetuados com os modelos e com as metodologias tradicionais

Pela Tabela 7 constata-se que, para as situações em que não se considerou o escoamento superficial, os modelos geraram valores iguais de espaçamento entre drenos, exceto para a simulação com o solo 1, que mostra pequena diferença do valor obtido com o SIMDRENO em relação aos obtidos com o DRAINMOD e o PRODREN.

Tabela 7. Espaçamentos entre os drenos (m) obtidos pela aplicação dos modelos PRODREN (PRO), SIMDRENO (SIM) e DRAINMOD (DRA) e pela utilização dos métodos propostos por Pizarro (PIZ) e Cruciani (CRU), não considerando o escoamento superficial, para os três tipos de solo

|        | Espaçamento |     |     |     |     |
|--------|-------------|-----|-----|-----|-----|
|        | PRO         | SIM | DRA | PIZ | CRU |
| Solo 1 | 45          | 40  | 45  | 16  | 22  |
| Solo 2 | 25*         | 25  | 25  | 13  | 16  |
| Solo 3 | 10*         | 10* | 10* | 5   | 4   |

\* Os valores presentes calculados foram negativos

Conforme a Tabela 8, nas simulações em que se considerou o escoamento superficial, os valores de espaçamento foram semelhantes para os três modelos, apenas nas simulações realizadas para o solo 1. Para os solos 2 e 3, com menores condutividades hidráulicas, os resultados obtidos com o PRODREN e com o SIMDRENO foram semelhantes, enquanto o DRAINMOD gerou valores menores de espaçamento entre

drenos, possivelmente pelo fato dos modelos PRODREN e SIMDRENO não considerarem o efeito do espaçamento entre os drenos sobre o escoamento superficial.

Tabela 8. Espaçamentos entre os drenos (m) obtidos pela aplicação dos modelos PRODREN (PRO), SIMDRENO (SIM) e DRAINMOD (DRA) e pela utilização dos métodos propostos por Pizarro (PIZ) e Cruciani (CRU), considerando o escoamento superficial, para os três tipos de solo

|        | Espaçamento |     |     |     |     |
|--------|-------------|-----|-----|-----|-----|
|        | PRO         | SIM | DRA | PIZ | CRU |
| Solo 1 | 50          | 45  | 50  | -   | 28  |
| Solo 2 | 35*         | 35  | 25  | -   | 22  |
| Solo 3 | 25*         | 20  | 10* | -   | 7   |

\* Os valores presentes calculados foram negativos

Ressalta-se que, em se tratando de dimensionamento de sistemas de drenagem subterrânea, a não consideração do escoamento superficial incorre em maior segurança. Portanto, este procedimento deve ser adotado, principalmente quando se utiliza o PRODREN ou o SIMDRENO. Esses modelos utilizam uma metodologia empírica para estimar o escoamento superficial, sujeita à considerável imprecisão no dimensionamento. Na Tabela 9 são apresentados os valores presentes médios obtidos.

Tabela 9. Valores presentes médios (R\$ ha<sup>-1</sup>) obtidos pela aplicação dos modelos PRODREN (PRO), SIMDRENO (SIM) e DRAINMOD (DRA), para os três tipos de solo

|        | Não Considerando o Escoamento Superficial |           |           | Considerando o Escoamento Superficial |          |           |
|--------|---|-----------|-----------|---------------------------------------|----------|-----------|
|        | PRO                                       | SIM       | DRA       | PRO                                   | SIM      | DRA       |
| Solo 1 | 2.401,21                                  | 4.212,15  | 4.269,81  | 1.742,56                              | 4.472,14 | 4.385,84  |
| Solo 2 | -720,39                                   | 2.049,46  | 2.461,02  | -748,67                               | 2.991,04 | 2.762,22  |
| Solo 3 | -5.175,68                                 | -2.232,79 | -2.086,79 | -2.066,93                             | 1.412,39 | -1.272,87 |

Verifica-se que os espaçamentos calculados conforme os critérios de Pizarro (1985) e Cruciani (1987) foram menores que os obtidos pela aplicação dos modelos, com base no balanço hídrico e nos critérios econômicos, em todas as situações analisadas. Esta discrepância ocorre em razão dos critérios tradicionais de dimensionamento não considerarem o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, o aspecto econômico e, no caso da metodologia de Pizarro (1985) o escoamento superficial.

Destaca-se que a utilização dos critérios preconizados por Pizarro (1985) e Cruciani (1987) não permite, de forma direta, a determinação da viabilidade econômica da implantação do sistema de drenagem na área, em contraposição ao que ocorre com a aplicação do PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD. Na simulação com esses modelos, a obtenção de valores presentes negativos implica em inviabilidade econômica do empreendimento. Na Tabela 9 são apresentados os valores presentes médios obtidos das simulações efetuadas com os modelos.

Observa-se na Tabela 9 que o PRODREN gerou menores valores presentes que os outros dois modelos. Isto é devido à redução da produtividade causada pelo déficit hídrico, cuja influência é maior neste modelo. Este fato faz com que o estudo

de viabilidade econômica do empreendimento, realizado com o PRODREN, seja mais rigoroso.

Observa-se que os métodos que utilizam critérios tradicionais de dimensionamento, consideram apenas o estresse, devido ao excesso de água no solo e, desta forma, não contemplam o melhor desempenho, do ponto de vista econômico. Enfatiza-se que a implantação de sistemas de drenagem com espaçamentos entre os drenos menores que os adequados, além de acarretar aumento dos custos de implantação e de manutenção, proporciona profundidades excessivas do lençol freático, em períodos de veranico. Conseqüentemente, pode ocorrer estresse em razão da deficiência de água na zona radicular, resultando em queda de produtividade, caso em que as medidas corretivas são a aplicação de lâminas de irrigação ou o controle da drenagem, o que também contribuiria para o aumento dos custos operacionais.

Nas análises econômicas realizadas neste trabalho, os modelos utilizaram o critério proposto por Wiser et al. (1974) no qual é considerada a produtividade média da cultura obtida para os anos analisados. Um outro critério, proposto por Skaggs (1981) evidencia que o espaçamento entre os drenos seja determinado mediante a utilização da produtividade provável de se obter com uma frequência de 80%, calculada pela equação de Kimball. A utilização deste critério tende a gerar espaçamentos um pouco menores pois, além de contemplar o aspecto econômico, visa diminuir os riscos, conforme comentários de Duarte (1997).

## CONCLUSÕES

1. Os resultados das simulações de rebaixamento do lençol freático, efetuadas pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD, foram similares para o espaçamento entre drenos de 10 m nos primeiros 5 dias, verificando-se a partir daí uma superestimativa pelo DRAINMOD em relação aos outros dois modelos. Para os maiores espaçamentos (30 e 50 m), notadamente nos primeiros 20 dias, observou-se semelhança de resultados obtidos com o PRODREN e o DRAINMOD, enquanto o SIMDRENO subestimou o rebaixamento.

2. No dimensionamento dos sistemas de drenagem, os espaçamentos entre drenos, indicados pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD, foram semelhantes. Maiores divergências foram observadas quando se considerou o escoamento superficial nas simulações para solos com menor condutividade hidráulica.

3. Os espaçamentos obtidos pela aplicação do PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD, nos quais o dimensionamento do sistema de drenagem é baseado no balanço hídrico e em análises econômicas foram consideravelmente maiores que os obtidos pelas metodologias tradicionais, que utilizam critérios preconizados por Pizarro e Cruciani.

4. A aplicação dos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD permite analisar a viabilidade da implantação de sistemas de drenagem, segundo o aspecto econômico em contraposição às metodologias tradicionais de dimensionamento de sistemas de drenagem.

## LITERATURA CITADA

- 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.
- Cruciani, D.E. A drenagem na agricultura. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1987. 337p.
- 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, 1998a.
- 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 II: validação de campo e aplicação. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.18, n.2, p.32-44, 1998b.
- 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.
- Pizarro, F. Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos. Madrid: Agrícola Española, 1985. 521p.
- Rogers, J.S. Water management model evaluation for shallow sandy soils. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.28, n.3, p.785-790, 1985.
- Sabbagh, G.L.; Fouss, J.L.; Bengtson, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.36, n.1, p.73-79, 1993.
- SCS - Soil Conservation Service. 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.
- 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.
- Young, T.C.; Ligon, J.T. Water table and soil moisture probabilities with tile drainage. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.15, n.2, p.448-451, 1972.