

JOÃO CARLOS FERREIRA BORGES JÚNIOR

**MODELO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E
MANEJO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

NOVEMBRO – 2000
JOÃO CARLOS FERREIRA BORGES JÚNIOR

**MODELO COMPUTACIONAL PARA DIMENSIONAMENTO E
MANEJO DE SISTEMAS DE DRENAGEM AGRÍCOLA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Magister Scientiae”.

APROVADA:

Prof.
(Conselheiro)

Prof.
(Conselheiro)

Prof.

Prof.

Prof. Paulo Afonso Ferreira
(Orientador)

Aos meus pais e irmãos.

À minha esposa, Andréia.

Ao meu filho, João Pedro.

Ao povo brasileiro que, apesar das dificuldades,
insiste em sonhar com um País melhor.

AGRADECIMENTO

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de realização do Curso.

Aos meus pais, irmãos e amigos e à minha esposa, pelo apoio em todas as horas.

Ao professor Paulo Afonso Ferreira, pela amizade e orientação neste trabalho.

Aos professores conselheiros Fernando Falco Pruski e Aziz Galvão da Silva Júnior, pela colaboração e assistência durante os trabalhos.

Aos professores Mauro Aparecido Martinez e Rubens Alves de Oliveira, pelas críticas e sugestões.

A todos os professores e funcionários do DEA, pelos ensinamentos e pela convivência.

Aos colegas do DEA, pelo apoio para a realização do Curso.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Enfim, a todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para conclusão deste trabalho.

BIOGRAFIA

JOÃO CARLOS FERREIRA BORGES JÚNIOR, filho de João Carlos Ferreira Borges e Maria Fontes Borges, nasceu em Ponte Nova-MG, em 31 de março de 1970.

Em 1988, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, concluindo-o em dezembro de 1992.

Em 1993, iniciou suas atividades de aperfeiçoamento profissional como bolsista do CNPq, na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), no Centro Nacional de Pesquisa do Milho e do Sorgo (CNPMS), na área de Irrigação, onde permaneceu até janeiro de 1994.

Em fevereiro de 1994, foi contratado pela empresa PATRUMEC, de Ribeirão Preto-SP, como Engenheiro Agrícola Encarregado de Obras, tendo executado projetos de drenagem e irrigação. Permaneceu nesta atividade até julho de 1997.

Em agosto de 1997, iniciou seus estudos no Programa Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de Mestrado, área de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em fevereiro de 2000.

CONTEÚDO

| | Página |
|---|---------------|
| EXTRATO | viii |
| ABSTRACT | x |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 6 |
| 2.1. Modelos para simulação do desempenho de sistemas de drenagem | 6 |
| 2.2. Aspectos relacionados à drenagem adequada | 14 |
| 2.2.1. Efeitos do excesso de água no solo sobre as culturas | 14 |
| 2.2.2. Efeitos da deficiência de água no solo sobre as culturas | 15 |
| 2.3. Aspectos econômicos relativos aos projetos de drenagem | 18 |
| 2.3.1. Períodos de análise | 19 |
| 2.3.2. Custos | 19 |
| 2.3.3. Benefícios | 21 |
| 2.3.4. Alguns métodos para avaliação econômica de projetos | 22 |
| 2.3.4.1. Valor presente ou valor atual (VP) | 22 |

| | |
|---|---------------|
| 2.3.4.2. Relação benefício-custo | 23 |
| | Página |
| 2.3.5. Taxa de juros a ser utilizada na análise econômica | 24 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS | 25 |
| 3.1. Desenvolvimento do modelo | 25 |
| 3.1.1. escoamento superficial e lâmina infiltrada | 28 |
| 3.1.2. Posição do lençol freático | 29 |
| 3.1.3. Cálculo do fluxo ascendente máximo | 32 |
| 3.1.4. Comparação entre o fluxo ascendente máximo de água no solo e a evapotranspiração real | 36 |
| 3.1.5. Profundidade efetiva do sistema radicular | 36 |
| 3.1.6. Balanço hídrico na zona radicular | 37 |
| 3.1.7. Índices básicos de desempenho do sistema de drenagem | 39 |
| 3.1.7.1. Soma do excesso de água (SEW_{30}) | 40 |
| 3.1.7.2. Número de dias secos (NDS) | 42 |
| 3.1.8. Estimativa da produtividade relativa da cultura | 43 |
| 3.1.8.1. Índice diário de estresse (IDS) | 44 |
| 3.1.8.2. Produtividade da cultura em resposta ao excesso de água no solo (YRW) | 45 |
| 3.1.8.3. Produtividade da cultura em resposta à deficiência de água no solo (YRD) | 46 |
| 3.1.8.4. Produtividades relativas médias (YTm, YRWm e YRDm) .. | 47 |
| 3.1.9. Análise econômica | 47 |
| 3.1.10. Fluxograma do PRODREN | 51 |
| 3.2. Comparação do rebaixamento simulado do lençol freático pelo PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD | 55 |
| 3.3. Comparação entre produtividades relativas médias esperadas e análises econômicas obtidas por simulações feitas pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD | 56 |
| 3.4. Comparações entre dimensionamentos realizados com base no balanço hídrico e nos critérios econômicos e aqueles com base nos critérios de drenagem tradicionais | 60 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 61 |
| 4.1. Apresentação da interface do PRODREN | 61 |

| | |
|---|---------------|
| 4.1.1. Formulários para entrada de dados | 61 |
| 4.1.1.1. Dados climáticos | 61 |
| | Página |
| 4.1.1.2. Dados de <i>seepage</i> | 63 |
| 4.1.1.3. Dados relativos ao solo | 63 |
| 4.1.1.4. Dados de escoamento superficial | 64 |
| 4.1.1.5. Dados relativos à cultura | 64 |
| 4.1.1.6. Dados relativos ao sistema de drenagem | 66 |
| 4.1.1.7. Dados para análise econômica | 67 |
| 4.1.2. Formulários de resultados | 67 |
| 4.1.2.1. Parâmetros de desempenho do sistema de drenagem | 68 |
| 4.1.2.2. Acompanhamento de variáveis | 68 |
| 4.1.2.3. Gráficos | 70 |
| 4.1.2.4. Combinação de espaçamento e profundidade de drenos que propicia o maior retorno econômico | 70 |
| 4.2. Comparação do rebaixamento simulado do lençol freático pelo PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD | 73 |
| 4.3. Comparação entre produtividades relativas médias esperadas e análises econômicas obtidas por simulações feitas pelos modelos PRODREN, SINDRENO e DRAINMOD | 76 |
| 4.3.1. Simulações não considerando o escoamento superficial | 78 |
| 4.3.2. Simulações considerando o escoamento superficial | 82 |
| 4.4. Comparações entre dimensionamentos realizados com base no balanço hídrico e nos critérios econômicos e aqueles com base nos critérios de drenagem tradicionais | 88 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES | 90 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |
| APÊNDICE | 100 |

EXTRATO

BORGES JÚNIOR, João Carlos Ferreira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2000. **Modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola.** Orientador: Paulo Afonso Ferreira. Conselheiros: Fernando Falco Pruski e Aziz Galvão da Silva Júnior.

Modelos computacionais com base nas teorias de drenagem agrícola têm sido desenvolvidos, objetivando o dimensionamento de sistemas de drenagem, a movimentação do lençol freático e o escoamento subterrâneo e superficial. O DRAINMOD e o SIMDRENO podem ser citados como exemplos. O desenvolvimento de um modelo computacional que tenha como metas suprir lacunas em relação aos modelos existentes, principalmente no que tange à disponibilidade de dados de entrada no País e à facilidade na comunicação com o usuário, certamente contribuirá tanto para a melhoria do dimensionamento quanto para o manejo de sistemas de drenagem agrícola, nas condições de solo e clima dos trópicos. Os objetivos deste trabalho foram desenvolver um modelo, visando suprimir essas lacunas, e comparar os resultados de simulações efetuadas com o novo modelo aos obtidos com o DRAINMOD e o SIMDRENO. O modelo,

denominado PRODREN, contabiliza diariamente os principais componentes do balanço hídrico (precipitação pluvial, infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação, fluxo ascendente do lençol freático e drenagem), em um volume de controle situado à meia distância entre dois drenos paralelos. Os principais dados de saída do modelo são: posição diária do lençol freático acima da linha dos drenos; escoamento superficial; soma do excesso de água (SEW_{30}); produtividade relativa da cultura, considerando os efeitos do excesso e da deficiência de água no solo; e valor presente, que é o parâmetro resultante da análise econômica do sistema de drenagem. Conseguiu-se, com o PRODREN, melhorar a comunicação com o usuário, em relação aos programas SIMDRENO e DRAINMOD. As limitações em relação à necessidade de dados horários de chuva pelo DRAINMOD foram superadas pelo PRODREN e pelo SIMDRENO, em razão do uso de uma equação de recarga intermitente. Ao analisar os resultados das simulações realizadas com o PRODREN, DRAINMOD e SIMDRENO, verificou-se que os valores dos índices econômicos calculados com os três modelos foram semelhantes, considerando níveis equivalentes de estresse, conseqüentes da deficiência de água no solo. As configurações ótimas de sistema de drenagem, segundo o aspecto econômico, calculadas pelos três modelos, foram similares. Os espaçamentos entre drenos obtidos pela aplicação dos modelos foram consideravelmente maiores do que aqueles obtidos pela aplicação dos critérios tradicionais de dimensionamento de sistemas de drenagem.

ABSTRACT

BORGES JÚNIOR, João Carlos Ferreira, M.S., Universidade Federal de Viçosa, November 2000. **Computational model for dimensioning and management of the systems in agricultural drainage.** Adviser: Paulo Afonso Ferreira. Committee members: Fernando Falco Pruski and Aziz Galvão da Silva Júnior.

Computational models based on theories of agricultural drainage has been developed, aiming at the dimensioning of drainage systems, the movement of the water table and the underground and superficial flowing. DRAINMOD and SIMDRENO may be mentioned as examples. The development of a computational model that aims to supply gaps in relation to the existent models, mainly when referring to the availability of entrance data in the Country and to the easiness in communication with the user, certainly will contribute for either improvement of the dimensioning and for system management in agricultural drainage under tropics' soil and climate conditions. The objectives of this study were to develop a model, seeking to suppress those gaps as well as to compare the results of simulations made with the new model to those obtained with DRAINMOD and SIMDRENO. The model, called PRODREN, daily counts the

main components of the water balance (pluvial precipitation, infiltration, surface flowing, evapotranspiration, percolation, up ward flow of the water table and drainage), in a control volume located at a half distance between two parallel drains. The main output from the model are: daily position of the water table above the drain base; surface flowing; sum of the excessive water (SEW_{30}); relative productivity of the culture, considering the effects from excess and deficiency of water in the soil; and present value, that is the parameter resulting from the economic analysis of the drainage system. With the application of PRODREN it was possible to improve the communication with the user, in relation to the programs SIMDRENO and DRAINMOD. Relatively to DRAINMOD need hourly rainfall data, the limitations were overcome by PRODREN and SIMDRENO, due to the use of an intermittent recharge equation. When analyzing the results from the simulations accomplished with PRODREN, DRAINMOD and SIMDRENO, it was verified that the values of the economic indexes calculated with these three models were similar, by considering the equivalent levels of stress, consequent to the deficiency of water in soil. According to the economic aspect, the optimum configurations of drainage system calculated by these three models were similar. The spacing between field drains obtained by application of the models were considerably larger than those obtained by application of the traditional dimensioning criteria in drainage systems.

1. INTRODUÇÃO

A drenagem agrícola tem como objetivos criar um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo. No entanto, a necessidade de drenagem varia de acordo com o clima da região. Em regiões de clima úmido e subúmido, ela se torna necessária para eliminar o excesso de água no solo, enquanto em regiões áridas e semi-áridas, para manter a concentração de sais, na solução do solo, em níveis toleráveis pelas culturas. O controle do espaço poroso do solo, visando proporcionar às plantas a disponibilidade de água e o arejamento adequados ao seu desenvolvimento, é um desafio a ser enfrentado por todos aqueles que se dedicam à área de irrigação e drenagem (FERREIRA, 1998).

No Brasil, os projetos de drenagem agrícola que objetivam a remoção do excesso de água da superfície do solo e, ou, da zona radicular são frequentemente encontrados em regiões de clima úmido e subúmido. Os perímetros irrigados situados no semi-árido brasileiro requerem, entretanto, projetos de drenagem que visem o controle dos índices de salinidade na solução do solo.

A maioria das grandes áreas irrigadas sofre os efeitos da salinização do solo em diferentes intensidades, razão pela qual muitas que inicialmente foram grandes produtoras de alimento tornaram-se terras salinizadas e improdutivas. A

FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) adverte que cerca de 50% dos 250 milhões de hectares irrigados no mundo apresentam problemas de salinização e arejamento do solo e que 10 milhões de hectares são abandonados anualmente devido a esses problemas. No Nordeste brasileiro, aproximadamente 30% das áreas irrigadas dos projetos públicos apresentam problemas de salinização, devendo-se ressaltar que algumas dessas áreas já estão improdutivas. No norte do Estado de Minas Gerais, existem também problemas de salinização, tanto em áreas de projetos públicos quanto privados (BERNARDO, 1997).

Os projetos de drenagem existentes no Brasil apresentam as mais diversas configurações, conforme as peculiaridades encontradas nas áreas que tenham problemas de drenagem.

Na Região Sudeste predominam várzeas úmidas de pequena extensão, que geralmente são incorporadas ao processo produtivo por meio da limpeza e, ou, retificação dos cursos d'água, sistematização ou regularização da superfície do solo e implantação de redes de drenos.

Nas regiões adjacentes ao litoral nordestino (litorânea e Zona da Mata), observam-se várzeas de dimensões médias a grandes, com baixas declividades, onde a ascensão do lençol freático ocorre em virtude das intensas chuvas sazonais e das variações diárias do nível dos rios, conforme as marés, além do escoamento superficial e subsuperficial proveniente de áreas adjacentes elevadas, denominadas tabuleiros. Além das obras já mencionadas, comuns na Região Sudeste, para a recuperação dessas áreas são necessárias, também, a construção de diques e a implantação de sistemas de bombeamento, objetivando promover a descarga da água de drenagem. O setor sucroalcooleiro nordestino tem sido o principal investidor na recuperação dessas áreas, que proporcionam altas produtividades, chegando a atingir cerca de duas a três vezes a produtividade média das demais áreas (geralmente inferior a 60 t/ha de cana-de-açúcar). Tal fato ocorre em razão da não-vulnerabilidade do cultivo aos períodos secos e da adequada qualidade dos solos que predominam naquelas várzeas.

DUARTE (1997) afirmou que, com a expansão das áreas cultivadas no Brasil, espera-se que seja necessária a implantação de projetos de drenagem em áreas maiores e, possivelmente, em regiões onde ainda não se dispõe de experiência prática local, como, por exemplo, na Região Centro-Oeste.

Embora métodos técnico-científicos de dimensionamento estejam disponíveis, os projetos de sistemas de drenagem são feitos, muitas vezes, com base nos conhecimentos práticos do projetista.

BOWER (1974) relatou que a limitada aplicação de procedimentos científicos no dimensionamento de sistemas de drenagem pode ser atribuída a vários fatores, como a complexidade das relações entre a produtividade das culturas e o teor de água no solo, a dificuldade em se prever a distribuição do conteúdo de água no perfil do solo em função da intensidade de drenagem e o custo das investigações de campo necessárias a um dimensionamento racional. Comparando o conhecimento existente sobre a teoria do movimento da água em direção aos drenos, as equações para o cálculo do espaçamento entre drenos, os métodos para medição da permeabilidade do solo, os materiais e métodos de drenagem etc., parece que a escassez de critérios de drenagem adequados constitui o elo mais fraco no dimensionamento correto de um sistema de drenagem. Ainda segundo o autor, a complexidade da questão aumenta quando se considera que um critério de drenagem adequado deve expressar a intensidade ótima de drenagem capaz de maximizar a diferença entre o retorno financeiro devido à drenagem e o custo do sistema.

O desenvolvimento e a aplicação de modelos computacionais de simulação na agricultura aumentaram sensivelmente a partir da década de 80, nos países desenvolvidos. Segundo SABBAGH et al. (1993), alguns desses modelos tornaram-se importantes ferramentas no estudo dos impactos de práticas agrícolas sobre a produtividade das culturas e sobre o meio ambiente.

Modelos com base nas teorias de drenagem agrícola foram desenvolvidos com o objetivo de simular a movimentação do lençol freático e o escoamento subterrâneo e superficial, em função dos parâmetros climáticos, das

características do solo e do sistema de drenagem. Podem ser citados: DRAINMOD (SKAGGS, 1981), SWATREN (WORKMAN e SKAGGS, 1989), EPIC-WT (SABBAGH et al., 1991), ADAPT (CHUNG et al., 1992), CSUID (GARCIA et al., 1995), LINKFLOW (HAVARD et al., 1995), WEPP (ASCOUGH II et al., 1997) e SIMDRENO (DUARTE, 1997).

SKAGGS (1990) afirmou que o DRAINMOD é o modelo que tem sido muito utilizado nas regiões úmidas dos Estados Unidos. Sua viabilidade foi comprovada para vários tipos de solos, culturas e condições climáticas nos estados americanos de Ohio, Carolina do Norte, Lousiana, Flórida, Michigan, Virgínia e Califórnia, e também na Bélgica. Reconhecido e incorporado ao acervo técnico do Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA-SCS), em 1980, esse modelo vem sendo largamente utilizado pelos engenheiros agrícolas daquela entidade.

Nas regiões brasileiras de clima úmido e subúmido, a utilização do DRAINMOD apresenta como limitação principal o fato de o modelo exigir, dentre os parâmetros de entrada, valores horários de precipitação. No Brasil, existem poucas estações que fornecem séries históricas de dados pluviográficos, e as séries existentes, de modo geral, ainda não foram adequadamente analisadas e processadas (DUARTE, 1997).

O modelo SIMDRENO foi desenvolvido por DUARTE (1997), com os objetivos de superar as dificuldades de aplicação do DRAINMOD nas regiões de clima úmido e subúmido brasileiras e de vir a contribuir efetivamente para o estabelecimento de critérios de drenagem mais adequados ao dimensionamento de sistemas de drenagem nessas regiões. O autor testou o SIMDRENO, comparando os valores simulados com as observações de campo e com as simulações feitas com o DRAINMOD. O SIMDRENO gerou resultados semelhantes aos obtidos pelo DRAINMOD, na estimativa da oscilação do lençol freático e na determinação do espaçamento entre drenos que propicia maior lucro ao final da vida útil do sistema de drenagem. O autor, no entanto, sugere que o desempenho do SIMDRENO deve ser melhorado a partir da inserção de algumas

modificações. É necessário também que a interface do SIMDRENO seja aperfeiçoada. O programa é executado no sistema operacional DOS e foi desenvolvido com o uso do compilador Turbo Pascal 6.0.

Destaca-se, então, a necessidade de desenvolvimento de um modelo computacional que vise suprir as lacunas em relação aos modelos existentes, principalmente no que tange à disponibilidade, no País, de informações para alimentação dos modelos e à facilidade de comunicação com o usuário, o que, certamente, irá contribuir para a melhoria do dimensionamento e do manejo de sistemas de drenagem agrícola nas condições de solo e clima dos trópicos. Tendo em vista estes aspectos, os objetivos deste trabalho foram:

a) Desenvolver um modelo computacional para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola, almejando as seguintes modificações em relação aos modelos existentes:

- melhorar a comunicação com o usuário;
- avaliar técnico-economicamente o sistema de drenagem para diferentes profundidades e espaçamentos de instalação de drenos; e
- implementar rotinas que capacitem o modelo a contabilizar, eficientemente, os efeitos do fluxo ascendente sobre o rebaixamento do lençol freático.

b) Comparar os resultados de simulações efetuadas com o novo modelo aos obtidos com o DRAINMOD e o SIMDRENO.

c) Comparar os valores de espaçamentos calculados com o novo modelo com aqueles resultantes da aplicação de critérios tradicionais de drenagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modelos para simulação do desempenho de sistemas de drenagem

Os sistemas de drenagem agrícola em áreas úmidas visam criar condições de aeração no solo que permitam o desenvolvimento adequado das culturas e as operações mecanizadas, como preparo de solo e colheita. As equações que caracterizam a produtividade das culturas em função das condições de umidade no solo são importantes ao projetar sistemas de drenagem que maximizem a produção, o uso de água e a eficiência de utilização de energia (HARDJOAMIDJOJO et al., 1982; BENGTON et al., 1993). O projeto de um sistema integrado de manejo de água-solo-planta deve considerar as propriedades do solo, a topografia, o clima, a cultura e os requerimentos de traficabilidade. A metodologia a ser utilizada para projetar e analisar sistemas de manejo de água-solo-planta deve permitir identificar 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). PIZARRO (1978) e FERREIRA (1998) ressaltaram, também, a importância do aspecto econômico. BELTRAN (1999) afirmou que estudos socioeconômicos e de impacto ambiental do projeto de drenagem devem ser realizados e que medidas mitigadoras, quando necessário, devem ser tomadas.

SCHILFGAARDE (1974) relatou a utilização, por pesquisadores americanos e holandeses, de equações com o objetivo de prever o comportamento do lençol freático em resposta a recargas intermitentes. São exemplos deste tipo de equação as de Schilfgaarde, de Zeeuw e Hellinga e de Kraijenhoff Van de Leur. A metodologia desenvolvida por Schilfgaarde, em 1965, para o dimensionamento de sistemas de drenagem, foi utilizada no desenvolvimento de outros modelos. Nesta metodologia é realizado um balanço hídrico na zona radicular da cultura, com base em uma seqüência de dados de precipitação e evapotranspiração, sendo, então, calculada a porcentagem da precipitação que contribui como recarga do lençol freático. Utilizando a equação por ele proposta, o autor simulou a movimentação do lençol freático. Este procedimento foi aplicado para uma série de vários anos, o que permitiu verificar se o sistema de drenagem atendia aos critérios preestabelecidos. Os resultados foram apresentados em forma de nomogramas, e incentivaram o desenvolvimento de novas metodologias de simulação com base em séries de dados climáticos.

Um modelo proposto por WISER et al. (1974) simula a posição do lençol freático, mediante o uso da equação de Schilfgaarde, e estima a produtividade da cultura da alfafa em função da movimentação do lençol. No entanto, este modelo não considera o escoamento superficial. Os resultados possibilitaram uma análise econômica que permite identificar a melhor combinação entre espaçamento e profundidade de drenos.

Os modelos desenvolvidos por YOUNG e LIGON (1972) e ARMSTRONG et al. (1980), para simular as variações de profundidade do lençol freático, também utilizam a equação de Schilfgaarde. Já o modelo desenvolvido por MINDERHOUD (1982) emprega a equação de Kraijenhoff.

SKAGGS (1974) desenvolveu uma metodologia para simular a posição do lençol em resposta às precipitações, considerando os efeitos da drenagem de superfície, da drenagem subterrânea e da evapotranspiração. A equação de Hooghoudt para regime permanente foi utilizada no cálculo da drenagem. O fluxo na região não-saturada foi calculado pela equação de Richards,

considerando que o escoamento subsequente à infiltração ocorre somente na direção vertical. Os resultados das simulações foram comparados com aqueles medidos no campo. O autor concluiu que essa metodologia poderia ser utilizada para avaliar o efeito da drenagem superficial sobre a resposta do lençol freático às chuvas, podendo a drenagem superficial ser caracterizada em termos do armazenamento superficial.

O modelo proposto por CHIENG et al. (1978) estima a posição do lençol freático e o teor de água na zona radicular, diariamente, e a duração e o número de vezes, por ano, em que o lençol supera determinada profundidade. Este modelo utiliza a equação de Hooghoudt para calcular o espaçamento entre drenos, conforme critérios de drenagem estabelecidos.

A partir da década de 80, os avanços na informática permitiram o desenvolvimento de modelos computacionais voltados para a agricultura. Os modelos com base nas teorias de drenagem surgiram como ferramentas de simulação do desempenho de sistemas de drenagem, considerando 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, com os objetivos de projetar e avaliar sistemas de drenagem para o 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. Pode ser usado para estimar a resposta do lençol freático e do teor de água no solo na zona não-saturada, em função de chuvas, evapotranspiração, intensidade de drenagem superficial e subterrânea e do uso de práticas de controle do lençol freático ou subirrigação. Registros de dados climáticos de vários anos foram utilizados no modelo para simular o desempenho diário de um dado sistema (SKAGGS, 1981). Deste modo, um sistema otimizado pode ser projetado em base probabilística, como inicialmente proposto por Schilfgaard, em 1965, e posteriormente por YOUNG e LIGON (1972) e WISER et al. (1974).

Segundo SKAGGS (1990), métodos aproximados são usados para quantificar os componentes hidrológicos, como: drenagem subterrânea, subirrigação, infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial. As equações de escoamento permanente desenvolvidas por Hooghoudt, Kirkhan e Ernst são usadas para calcular a drenagem e a subirrigação. A velocidade de infiltração é estimada pela equação de Green e Ampt. Os dados de entrada do modelo incluem propriedades do solo, dados climáticos, parâmetros relacionados à cultura e parâmetros locais. As propriedades do solo incluem a condutividade hidráulica do meio saturado (por camadas), as relações entre volume de drenagem e profundidade do lençol freático e as informações relativas ao fluxo ascendente oriundo do lençol freático. Um outro dado de entrada é a profundidade efetiva da zona radicular em função do tempo.

Os dados horários de precipitação e temperaturas máximas e mínimas são obtidos de registros climáticos, e o balanço hídrico é realizado em base horária. Os resumos das estimativas dos componentes hidrológicos como infiltração, drenagem, evapotranspiração etc. são disponibilizados em bases diária, mensal e anual. O efeito do manejo na produtividade é também avaliado, assim como a traficabilidade (SKAGGS, 1990). Segundo HARDJOAMIDJOJO et al. (1982), o índice diário de estresse, desenvolvido por Hiler, em 1969, é usado para calcular a resposta da cultura ao excesso e à deficiência de água no solo.

SKAGGS (1990) comentou que o DRAINMOD tem sido testado para vários tipos de solos, culturas e condições climáticas. Os resultados de testes em Ohio (SKAGGS et al., 1981), Carolina do Norte (SKAGGS, 1982), Califórnia (CHANG et al., 1983), Lousiana (FOUSS et al., 1987; GAYLE et al., 1987), Flórida (ROGERS, 1985), Michigan, Virgínia (McMAHON et al., 1988), Iowa (SANOJA et al., 1990), Geórgia (SHIRMOHAMMADI et al., 1991) e Bélgica indicaram o sucesso nas simulações de movimentação do lençol freático e desempenho da drenagem, realizadas pelo modelo.

BENGTSON et al. (1993) relataram que o DRAINMOD não é facilmente aplicável a situações diárias de manejo do lençol freático, por requerer vários

parâmetros de entrada. O autor propôs um modelo menos complexo para estimar diariamente a posição do lençol freático, baseando-se na equação de Zeeuw e Hellinga, ao qual ele denominou FWTMOD (“Fluctuating Watertable Model”), e comparou os resultados de simulações realizadas pelo FWTMOD e pelo DRAINMOD, em condições de solo e clima do vale do baixo Mississipi. As comparações indicaram boas aproximações entre os resultados das simulações realizadas pelos dois modelos, tendo sido obtido um desvio-padrão igual a 18,6 cm entre as profundidades do lençol estimadas pelos dois modelos.

KURIEN et al. (1997) desenvolveram um estudo que visava determinar a área de contribuição de escoamento subterrâneo para os drenos em sistemas de drenagem irregulares. Tal informação permite a estimativa das perdas de nitrato por unidade de área. Os autores desenvolveram uma rotina para determinar o espaçamento que minimizava as diferenças entre os valores de vazão de drenagem medidos e os simulados pelo DRAINMOD.

Outro modelo, denominado SWATREN, com base na solução da equação de Richards por diferenças finitas, foi desenvolvido para calcular o movimento vertical de água na região não-saturada do solo. O modelo requer dados de precipitação, evaporação e transpiração potenciais, em períodos de 24 horas. A profundidade radicular, que pode ser variável com o tempo, é um dado de entrada no modelo. O sistema solo pode ser dividido em várias camadas. A curva característica da água no solo e a função condutividade hidráulica, para cada camada, são também dados de entrada. WORKMAN e SKAGGS (1989) implementaram modificações nesse modelo, para possibilitar sua aplicação a situações em que o lençol atinge a superfície do solo. Utilizando dados de medidas de profundidade de lençol freático, os autores aplicaram esse modelo e o DRAINMOD. O erro-padrão médio entre os valores simulados pelo SWATREN e os valores medidos foi de 13,4 cm. O erro-padrão médio entre os valores simulados pelo DRAINMOD e os valores medidos foi de 11,4 cm. Os autores concluíram que o SWATREN pode ser usado para simular a resposta da drenagem em solos onde o lençol freático atinge a superfície.

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, 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. Para calcular a posição diária do lençol freático, o modelo permite 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 o sistema de drenagem mais viável para cada situação.

DUARTE (1997) comparou o desempenho do SIMDRENO com o do modelo norte-americano DRAINMOD e analisou o ajuste do modelo aos dados de oscilação do lençol freático e do volume de escoamento superficial e subterrâneo medidos no campo. Realizou, também, simulações de rebaixamento do lençol freático com a aplicação dos dois modelos, para três espaçamentos entre drenos. Utilizando uma série de dados climáticos de 21 anos, comparou os resultados de espaçamentos econômicos obtidos pelos dois modelos com aqueles obtidos com o uso dos critérios tradicionais de dimensionamento, preconizados por Pizarro, em 1978, e Cruciani, em 1987. Nas avaliações de campo, realizadas em situações com baixos valores de coeficiente de armazenamento (espaçamento entre drenos igual a 10 m), o SIMDRENO simulou as posições do lençol freático com menor erro-padrão do que o DRAINMOD. Foi também verificado que ambos os modelos superestimaram o escoamento superficial e subestimaram a vazão de drenagem. O SIMDRENO tendeu a subestimar o rebaixamento do lençol, em comparação ao DRAINMOD, à medida que os valores de

espaçamento entre drenos aumentavam. Os índices anuais de desempenho de sistemas de drenagem simulados pelos dois modelos, exceto a produtividade relativa devido à deficiência de água no solo, foram similares nas aplicações em que não foi considerado o escoamento superficial e os valores do coeficiente de armazenamento eram menores que 15 dias. As análises econômicas realizadas pelos dois modelos indicaram espaçamento entre os drenos semelhantes e maiores que os obtidos com o uso dos métodos tradicionais de dimensionamento.

Um modelo computacional de simulação, denominado LINKFLOW, foi desenvolvido por HAVARD et al. (1995) para simular o movimento do lençol freático durante as práticas de manejo da drenagem. HAVARD et al. (1997) conduziram o trabalho de validação deste modelo. Nesse trabalho, os resultados de simulações foram comparados aos dados de rebaixamento do lençol, obtidos na literatura. Os autores concluíram que o LINKFLOW simula os processos de escoamento de água envolvidos em sistemas de manejo de lençol freático com precisão similar à obtida por outros modelos. Os coeficientes de variação entre os valores simulados e medidos de profundidade do lençol foram menores que 15%.

Modelos como o DRAINMOD, FWTMOD, SIMDRENO e LINKFLOW simulam a movimentação do lençol freático e os componentes do balanço hídrico em áreas situadas entre drenos paralelos, enquanto o modelo WATRCOM, desenvolvido por PARSONS et al. (1991), simula a movimentação do lençol, a vazão de drenagem e a produtividade relativa esperada em qualquer posição de uma área de até 1.000 hectares.

Conforme DUARTE (1997), nos anos 80, paralelamente ao desenvolvimento dos modelos de avaliação de sistemas de drenagem, vários outros modelos foram propostos com o objetivo de simular o escoamento superficial e o processo erosivo. Posteriormente, alguns desses modelos sofreram modificações, que permitiram sua aplicação em áreas dotadas de drenos subterrâneos. São exemplos:

- “Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation – ANSWERS” (BEASLEY et al., 1980);

- “Erosion Productivity Impact Calculator – EPIC” (SABBAGH et al., 1991);
- “Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems – GLEAMS” (LEONARD et al., 1987);
- “Kentucky Erosion Model – KYERMO” (HIRSCHI e BARFIELD, 1988);
- EPIC-WT (SABBAGH et al., 1991);
- “Agricultural Drainage Pesticide Transport - ADAPT” (CHUNG et al., 1992; GOWDA et al., 1999);
- “Agricultural NonPoint Source - AGPNS” (YOUNG et al., 1995);
- “Precipitation-Runoff Modeling System - PRMS” (LEAVESLEY e STANNARD, 1995);
- “Equação Universal de Perdas de Solo Revisada” - RUSLE (RENARD, 1997); e
- “Water Erosion Prediction Project - WEPP” (ASCOUGH II et al., 1997).

O erro-padrão entre hidrógrafas de lençol freático medidas e simuladas é um parâmetro muito utilizado para avaliar a precisão de um modelo em estimar a posição do lençol freático. O Quadro 1 apresenta alguns valores obtidos em estudos conduzidos por diversos autores, utilizando o DRAINMOD e o SIMDRENO.

Quadro 1 - Valores de erro-padrão entre hidrógrafas de lençol freático medidas e simuladas

| Autores | Modelo | Erro-padrão (cm) |
|-----------------------------|---------------|-------------------------|
| CHANG et al. (1983) | DRAINMOD | 6,0 a 24,0 |
| ROGERS et al. (1985) | DRAINMOD | 7,4 a 13,1 |
| FOUSS et al. (1987) | DRAINMOD | 14,1 a 20,8 |
| WORKMAN e SKAGGS (1989) | DRAINMOD | 7,5 a 19,0 |
| SANOJA et al. (1990) | DRAINMOD | 10,1 a 21,7 |
| SHIRMOHAMMADI et al. (1991) | DRAINMOD | 0,0 a 10,0 |
| BENGTSON et al. (1993) | DRAINMOD | 16,4 a 24,0 |
| REYES et al. (1993) | DRAINMOD | 7,8 a 34,7 |

| | | |
|-----------------------|----------|------------|
| SABBAGH et al. (1993) | DRAINMOD | 7,0 a 26,9 |
| DUARTE (1997) | DRAINMOD | 4,5 a 12,2 |
| DUARTE (1997)* | SIMDRENO | 4,1 a 10,4 |

* Utilizando a equação de Krayjenhoff Van de Leur - Maasland.

2.2. Aspectos relacionados à drenagem adequada

O projeto de sistemas agrícolas de manejo de água eficientes torna-se cada vez mais imprescindível, devido ao aumento da competição pelo uso dos recursos hídricos e ao aumento do custo de instalação e operação desses sistemas. Em regiões úmidas, a drenagem artificial é necessária para permitir o cultivo em solos potencialmente aptos a proporcionar altas produtividades. A drenagem possibilita as operações agrícolas mecanizadas e proporciona um ambiente adequado ao desenvolvimento das culturas. Por outro lado, a drenagem excessiva é indesejável, pois reduz a quantidade de água disponível no solo para a cultura e causa lixiviação de nutrientes fertilizantes, carreando-os para cursos d'água receptores, onde atuam como poluentes. Em alguns casos, o controle do lençol freático ou a subirrigação 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).

2.2.1. Efeitos do excesso de água no solo sobre as culturas

As propriedades físicas do solo mais afetadas pela deficiência de drenagem, ou seja, pelo excesso de água no solo, são: aeração, estrutura, permeabilidade, textura e temperatura. Nas áreas úmidas, onde frequentemente o lençol freático atinge a superfície, verificam-se plantas com sistema radicular pouco desenvolvido e restrito a um pequeno volume de solo, que ficam

vulneráveis ao déficit hídrico durante os períodos de estiagem ou veranico (FERREIRA, 1998).

Segundo HILER (1969) e WESSELING (1974), a determinação da oscilação do lençol freático resulta na adequada caracterização do requerimento de drenagem. HARDJOAMIDJOJO et al. (1982) afirmaram que a profundidade do lençol não determina, diretamente, o desenvolvimento das culturas, mas é um indicativo das condições da água no solo. Provavelmente, a principal razão de se relacionar a profundidade do lençol à produção é que este parâmetro é mais facilmente medido que outros, como a distribuição de concentração de oxigênio e de outros gases no perfil do solo. Os autores relataram que numerosos experimentos de campo e de laboratório têm sido conduzidos para a determinação dos efeitos da profundidade do lençol freático sobre a produção das culturas.

O excesso de água modifica sensivelmente as características do perfil do solo, alterando suas propriedades químicas e biológicas. As mudanças na zona radicular, motivadas pela ausência da fase gasosa, podem resultar em grandes danos à sobrevivência das plantas. Nesta situação, a absorção de água pelas raízes é limitada, sendo produzido um estresse similar àquele produzido pela seca, embora as causas e os mecanismos sejam distintos (TARJUELO e JUAN, 1999).

WESSELING (1974) relatou que as espécies diferentes de plantas respondem de forma diferenciada à profundidade do lençol freático, e que para se determinar uma profundidade ótima do lençol é necessário conhecer o requerimento da cultura, as características do solo, os procedimentos de irrigação e as condições climatológicas.

A Figura 1 ilustra o processo que conduz à redução do desenvolvimento da planta e da produtividade devido ao excesso de água no solo (TARJUELO e JUAN, 1999).

2.2.2. Efeitos da deficiência de água no solo sobre as culturas

A resposta da cultura à disponibilidade de água depende de fatores relativos ao solo, clima, manejo e tipo de cultura (SALTER e GOODE, 1967).

O déficit hídrico pode afetar a maioria dos fatores relacionados ao desenvolvimento das plantas: anatomia, morfologia e fisiologia, logo os principais processos metabólicos e de crescimento são afetados. Os efeitos mais óbvios do estresse hídrico proporcionado pela deficiência de água no solo são a redução do tamanho das plantas, a redução da área foliar e a queda de produtividade. As plantas podem manter sua turgidez pelo ajustamento osmótico,

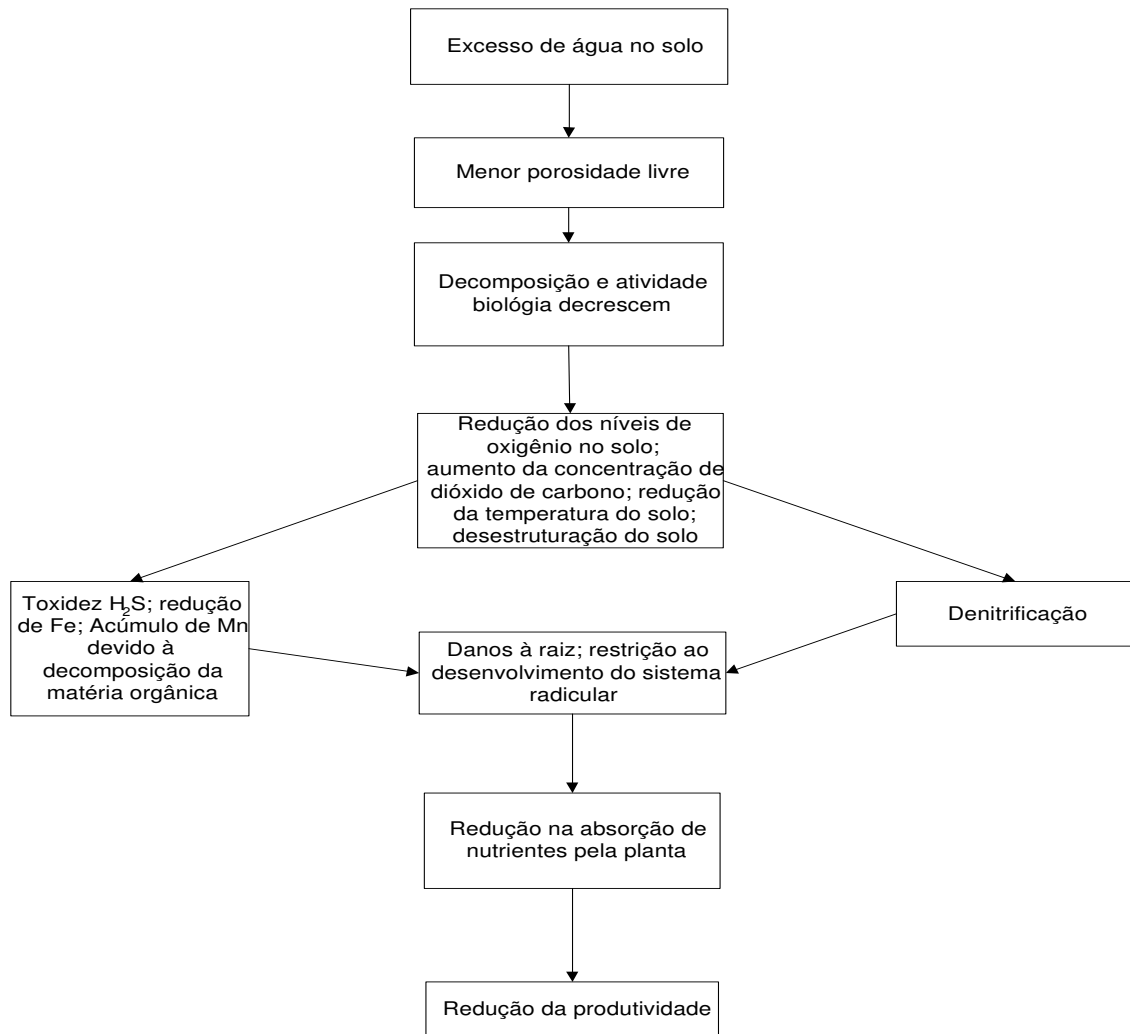


Figura 1 - Processo que leva à redução da produtividade da cultura, devido ao excesso de água no solo.

sendo esta capacidade diferenciada entre espécies e variedades. Órgãos de uma mesma planta diferem quanto ao ajustamento osmótico, o que pode ser importante para garantir a sobrevivência a curto prazo, em períodos de seca, mas não a longo prazo. A quantidade e a qualidade de desenvolvimento da planta dependem da divisão, do aumento e da diferenciação celular, sendo todos esses processos afetados pelo déficit hídrico, embora não com a mesma magnitude. Além de afetar o desenvolvimento das folhas, a falta de água pode levar à senescência e morte das folhas durante o período de crescimento. O desenvolvimento de brotos também é prejudicado. O efeito do estresse durante o estágio vegetativo é o menor desenvolvimento das folhas, o que reduz o índice de área foliar na maturidade e resulta em menor interceptação da luz pela cultura. O

défice hídrico pode acarretar no fechamento de estômatos e, conseqüentemente, na redução da fotossíntese e da respiração noturna (TARJUELO e JUAN, 1999).

DOORENBOS e KASSAM (1979) relataram que a deficiência de água no solo pode acarretar, para algumas culturas, em aumento de eficiência na utilização da água, enquanto para outras pode acarretar em diminuição, o que leva a respostas diferenciadas das produtividades das culturas em relação ao défice hídrico. Quando este ocorre durante determinada parte do período de crescimento de uma cultura, seu efeito sobre o rendimento pode variar bastante, dependendo do grau de sensibilidade da cultura nesse período. Segundo os autores, as culturas são mais sensíveis ao défice hídrico durante a emergência, a floração e a fase inicial de formação da colheita, do que nas fases inicial e final do crescimento. O efeito da deficiência de água no solo pode também ser diferenciado entre as variedades de uma mesma espécie.

Segundo Kramer, citado por TARJUELO e JUAN (1999), o estresse proporcionado pela deficiência de água no solo nem sempre pode ser considerado como injúria. Embora o desenvolvimento vegetativo seja reduzido, às vezes ocorrem melhorias de qualidade dos produtos vegetais. Por exemplo, sabe-se que um estresse moderado pode melhorar a qualidade de maçãs, pêras e ameixas, e aumentar proteínas no trigo.

Considerando o período total de crescimento, geralmente a queda de rendimento torna-se proporcionalmente menor com o aumento do défice hídrico em culturas como algodão, girassol, amendoim, soja e beterraba-açucareira, enquanto em culturas como banana, milho, feijão e cana-de-açúcar é proporcionalmente maior (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

2.3. Aspectos econômicos relativos aos projetos de drenagem

A análise econômica de projetos é um instrumento que facilita a determinação das melhores alternativas, ou simplesmente permite decidir se é ou não viável um determinado investimento (PIZARRO, 1978).

Conforme comentários de DURNFORD et al. (1984), 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. De acordo com a definição, a otimização de projetos de drenagem envolve dois aspectos distintos. O primeiro refere-se 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. O segundo aspecto é econômico, isto é, a avaliação do custo da drenagem e do retorno propiciado pelo incremento na produtividade.

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

Conforme GITTINGER (1972), um projeto é o conjunto das atividades envolvidas no uso de recursos, visando ganho de benefícios. O objetivo da análise econômica dos projetos agrícolas é comparar custos e benefícios, para determinar qual alternativa é mais remunerativa. Portanto, para que a análise econômica seja feita é necessário que os custos e benefícios sejam identificados.

2.3.1. Período de análise

A análise econômica deve ser realizada para um determinado período. GITTINGER (1972) afirmou que, como regra geral, o período de análise econômica deve ser igual à vida econômica de um projeto. Em alguns projetos, a vida econômica pode ser menor que a vida técnica, devido à obsolescência.

Poucos projetos agrícolas precisam ser analisados em períodos superiores a 25 anos, pois o retorno de um investimento após este período não faz diferença no estudo das alternativas de projeto.

Um critério aceitável para estabelecer o período de análise é limitá-lo à vida técnica útil do investimento principal. O período de análise pode ser de 20 a 30 anos (PIZARRO, 1978).

COSTA (1994) conduziu um estudo que teve como um dos objetivos a determinação de parâmetros indicadores do melhor espaçamento entre drenos, segundo o aspecto econômico, para um sistema de drenagem agrícola. A avaliação econômica foi realizada, considerando a vida útil do sistema igual a 30 anos, conforme as recomendações da FAO (1986).

2.3.2. Custos

Em quase todos os projetos agrícolas, os custos são mais facilmente identificáveis que os benefícios (GITTINGER, 1972). Segundo NORONHA (1987), existem dois tipos de fluxos de saída. O primeiro refere-se às despesas de investimento, nas quais estão incluídos todos os gastos com bens de capital, inclusive despesas cujo valor se incorpora ao dos bens de capital na fase de construção ou implantação do projeto. O outro tipo de fluxo de saída é denominado de despesas operacionais, que são as despesas feitas para o funcionamento do projeto, após a implantação.

As séries de custos são feitas, situando no tempo os diversos custos a serem realizados. Devem ser considerados os custos de execução da obra, aquisições de máquinas, manejo das instalações de irrigação e drenagem, conservação das obras etc. É recomendável que os custos de produção agrícola não sejam incluídos (PIZARRO, 1978).

As séries de custo devem ser confeccionadas para as situações nas quais se consideram a presença e a ausência do projeto. A diferença entre ambas

constitui a série de incremento dos custos (GITTINGER, 1972; WISER et al., 1974; PIZARRO, 1978).

CARVALLO et al. (1998) afirmaram que no desenvolvimento de um modelo para otimização de produção da agricultura irrigada, considerando que as terras já são de propriedade do empreendedor, o custo da terra não deve ser considerado na análise econômica. Os custos indiretos como administração, impostos etc. também não devem ser incluídos, por não serem relevantes na decisão de alternativas de produção.

Os projetos de drenagem implantados nas regiões litorâneas e Zona da Mata nos Estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, geralmente, compreendem a construção de rede de drenos subterrâneos abertos e espaçados de 50 a 100 m, drenos interceptores e, muitas vezes, diques de proteção e estações de bombeamento. Os valores cobrados por empresas empreiteiras para a implantação de projetos nessas regiões são da ordem de US\$ 1,000/ha.

Segundo Boumans e Smedema, citados por DUARTE (1997), a profundidade de instalação de drenos tubulares tem grande influência na composição dos custos. O custo por unidade de comprimento se eleva com o aumento da profundidade. Maiores profundidades permitem maiores espaçamentos entre os drenos, o que implica maior área de captação e, conseqüentemente, maiores diâmetros de tubos e maiores dispêndios com envelope. Os valores podem variar de US\$ 1,25/m para drenos instalados a 1,20 m de profundidade, na Holanda, até US\$ 8,50/m para drenos instalados a 3,00 m de profundidade, no Iraque.

Conforme LEITCH (1983), a manutenção dos drenos é um fator de manejo que influencia os custos de drenagem. Os requerimentos de manutenção anual dependem da erodibilidade do solo, da frequência de travessia de máquinas, das chuvas, do vento, da vegetação e das características dos drenos abertos, como declividade e talude. Os custos de manutenção dos drenos abertos são estimados em 3% do valor inicial, por ano, ou um terço do custo original a cada sete anos.

Essas duas estimativas têm impactos semelhantes no valor presente dos custos de drenagem.

Em relação a drenos cobertos, a manutenção tem o objetivo de corrigir danos em virtude do acúmulo de sedimentos, da quebra da ponta externa, do achatamento proporcionado pela passagem de máquinas pesadas, do entupimento por raízes, de animais etc. (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1973; FAUSEY et al., 1982). O custo anual de manutenção da rede de drenos subterrânea pode ser estimado em 0,5% do custo de implantação (DUARTE, 1997).

Deve também ser considerada a manutenção dos sistemas de bombeamento e dos diques, se estes existirem (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1973).

2.3.3. Benefícios

Os benefícios em projetos agrícolas podem ser originários do aumento dos valores de produção, o que é mais comum, ou da redução dos custos. A forma específica na qual os benefícios aparecem, de qualquer modo, não é sempre óbvia, e a avaliação dos problemas pode ser bastante difícil. Em relação à redução de custos, pode-se citar a diminuição dos gastos com mão-de-obra, proporcionada pela mecanização (GITTINGER, 1972).

WISER et al. (1974) classificaram os benefícios econômicos proporcionados pela drenagem em duas categorias. A primeira refere-se ao aumento na produtividade e qualidade do produto e a segunda, às melhorias das condições de trabalho.

Segundo PIZARRO (1978), os benefícios proporcionados por um sistema de drenagem compreendem diversos conceitos. O primeiro deles se refere aos benefícios proporcionados pela exploração agrária. Outro conceito que deve ser considerado é o proporcionado pelo valor residual das obras, das instalações, das maquinarias etc., ao final do período de análise. Estes conceitos referem-se aos benefícios diretos, que são os que afetam o agricultor diretamente. De forma

similar à série de custos, a série de benefícios deve ser feita para situações com e sem a presença do projeto. A diferença entre ambas é denominada de série de incremento de benefícios. A série de benefícios deve ser elaborada, associando os benefícios previstos com os anos correspondentes.

2.3.4. Alguns métodos para avaliação econômica de projetos

De acordo com NORONHA (1987), os métodos mais adequados de avaliação e seleção de projetos, segundo o aspecto econômico, são aqueles que utilizam técnicas de desconto. Neste contexto, a técnica do valor presente é uma das mais aconselháveis.

2.3.4.1. Valor presente ou valor atual (VP)

Segundo WOILER e MATHIAS (1986), o valor atual líquido pode ser definido como a soma algébrica dos saldos do fluxo de caixa, descontando-se determinada taxa de juros (também chamada taxa de desconto). Quanto maior o valor atual líquido a uma dada taxa de desconto, mais desejável é o projeto para a empresa, pois maior é o seu potencial de ganho. Por outro lado, se o valor atual líquido for menor que zero, então o projeto deve ser rejeitado, porque os ganhos não cobrem o custo de capital da empresa. A grande vantagem da utilização deste índice é que o valor do dinheiro no tempo e as receitas ao longo de toda vida do projeto são levados em conta.

Conforme NORONHA (1987), o investimento deve ser feito somente se o projeto representar um aumento no valor presente do patrimônio líquido da empresa. Quando se avalia um projeto independente de outras alternativas, o critério de decisão consiste em aceitá-lo se $VP > 0$.

Às vezes, utiliza-se o termo “valor presente líquido” para chamar a atenção para o fato de que os fluxos monetários medem a diferença entre as

receitas operacionais líquidas e os investimentos adicionais feitos com o projeto (GITTINGER, 1972; NORONHA, 1987).

Segundo KANWAR et al. (1983), o valor presente de um projeto de drenagem vai depender do tipo de solo, da drenagem da área antes do projeto, do tipo de cultura, dos fatores climáticos, entre outros.

2.3.4.2. Relação benefício-custo

GITTINGER (1972) definiu a relação benefício-custo como a razão entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos. Conforme NORONHA (1987), este método invoca a idéia central de qualquer análise de investimentos, ou seja, deve-se verificar se os benefícios são maiores que os custos. O resultado será sempre consistente com a análise do valor presente.

Em termos de análise, o projeto passa a ser caracterizado por duas seqüências de fluxo de caixa: uma de benefícios e outra de custos. Um projeto economicamente interessante é aquele em que a relação benefício-custo é maior que a unidade, o que significa que o valor atual dos benefícios é maior que o valor atual dos custos, considerando a taxa de juros adotada (WOILER e MATHIAS, 1986).

A relação benefício-custo é um índice de rentabilidade muito popular e amplamente utilizado em análises econômicas de empreendimentos governamentais, mas raramente ela é empregada para analisar investimentos privados (GITTINGER, 1972; PIZARRO, 1978).

2.3.5. Taxa de juros a ser utilizada na análise econômica

À medida que a taxa de juros aumenta, a relação benefício-custo e o valor presente diminuem. Tal fato ocorre porque a utilização de taxas baixas equivale a dar maior importância aos benefícios futuros, em detrimento dos

gastos mais próximos. Por outro lado, à medida que a taxa aumenta, é dada maior importância aos gastos presentes do que aos benefícios futuros (WOILER e MATHIAS, 1986).

Para calcular o valor presente ou a relação benefício-custo, a taxa mais apropriada é a do custo de oportunidade do capital. A taxa deve refletir a escolha feita pela sociedade, entre retornos presentes e futuros (GITTINGER, 1972). Segundo PIZARRO (1978), a taxa de juros é estabelecida pelas autoridades econômicas dos países.

Segundo BUARQUE (1991), ao investir uma certa quantia de dinheiro próprio em um projeto, o investidor sabe que está deixando de ganhar um rendimento que lhe é oferecido naturalmente pelo sistema financeiro, por meio de diferentes mecanismos existentes. Isto quer dizer que o investimento do capital tem um custo de oportunidade que não está contabilizado no orçamento de receitas e custos. O custo de oportunidade de capital é um custo financeiro que equivale à perda que o capital investido sofre por estar vinculado ao projeto, e não poder ser investido em nenhuma outra alternativa oferecida pelo mercado. Normalmente, o valor está compreendido entre 8 e 15% (GITTINGER, 1972; PIZARRO, 1978).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Desenvolvimento do modelo

O modelo, doravante denominado PRODREN, foi desenvolvido mediante o uso do programa Delphi 3, visando melhorar a interface em relação aos modelos existentes. Contabiliza, diariamente, os principais componentes do balanço hídrico, em um volume de controle de base unitária e altura igual à profundidade da camada impermeável, simulando a posição do lençol freático. O limite superior do volume de controle é o lençol superficial, quando o perfil do solo estiver saturado e a sua superfície estiver coberta por uma lâmina de água. O volume de controle considerado está situado à meia distância entre dois drenos paralelos. Os componentes do balanço hídrico considerados são: 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.

O termo *seepage*, conforme PIZARRO (1978), refere-se às infiltrações de origens distintas (como canais, áreas altas irrigadas e lagos) que se manifestam em áreas mais baixas, podendo alcançar a superfície.

O PRODREN é um modelo iterativo, composto das etapas mostradas, resumidamente, a seguir:

A) 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 (1972), vinculado ao Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA). Considera-se que infiltra a parcela da precipitação não-convertida em escoamento superficial.

B) Simulação da posição diária do lençol freático

Na primeira simulação, é utilizado o valor da parcela de precipitação que infiltra, calculada na etapa A, acrescido da lâmina de *seepage*, se esta ocorrer, para calcular a recarga do lençol freático no dia “y”, 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; e

see_y = lâmina de *seepage* no dia “y”, mm.

Para estimar a posição do lençol freático em resposta às recargas efetivas diárias, utiliza-se a equação de Krajenhoff Van de Leur-Maasland.

C) 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 ($etzr_y$), evapotranspiração real diária oriunda do lençol freático ($etlf_y$) e parcela de precipitação pluvial diária que atinge o lençol freático ($pinflf_y$).

D) 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:

$$rec_y = pinflf_y + see_y - etlf_y$$

(2)

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).

E) Cálculo dos parâmetros de avaliação de desempenho do sistema de drenagem

Os parâmetros de desempenho 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 da deficiência de água no solo (YRD); e produtividade relativa total (YT). Estes parâmetros são utilizados em vários trabalhos relacionados a estudos dos efeitos do excesso ou da falta de água no solo sobre a produtividade das culturas (HILER, 1969; HARDJOAMIDJOJO et al., 1982; CHANG et al., 1983; CARTER et al., 1985; CRUCIANI, 1985; FOUSS et al., 1987; GAYLE et al., 1987; VILDOSO, 1995; DUARTE, 1997; entre outros). Em seguida, efetua-se a análise econômica, calculando-se o *valor presente* e a relação *benefício-custo*.

3.1.1. Escoamento superficial e lâmina infiltrada

O PRODREN permite a opção de considerar ou não o escoamento superficial. Quando ele não é considerado, tem-se a situação típica de uma área a ser drenada fechada por diques. Na maioria dos casos, porém, o escoamento superficial deve ser considerado.

A metodologia utilizada na estimativa do escoamento superficial é a do Número da Curva. Segundo esta metodologia, a lâmina de escoamento superficial é calculada utilizando a equação:

$$pesc = \frac{(pre - 0,2 sip)^2}{(pre + 0,8 sip)} \quad (3)$$

em que

pesc = lâmina que escoa superficialmente, mm;

pre = precipitação total, mm;

sip = máxima retenção potencial, mm.

A máxima retenção superficial é calculada pela equação:

$$sip = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) 25,4 \quad (4)$$

em que CN é o número da curva (adimensional), podendo variar de 1 a 100, dependendo do uso e manejo da terra, do grupo de solo, da condição hidrológica e da umidade antecedente do solo (PRUSKI e SILVA, 1997).

3.1.2. Posição do lençol freático

O PRODREN utiliza a equação de recarga intermitente de Kraijenhoff Van de Leur – Maasland para estimar a posição do lençol freático em resposta às recargas efetivas diárias, isto é:

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

(5)

em que

hlf_t = altura do lençol freático sobre o plano que contém os drenos, no instante t , em resposta a uma dada recarga, m ;

ni = número de ordem da série;

\exp = número neperiano, aproximadamente igual a 2,718282;

rec = recarga efetiva de intensidade constante, m/dia ;

μ_d = porosidade drenável do solo, decimal;

b = duração da recarga, dia ;

t = período de tempo contado desde o início da recarga, dia ; e

j = fator de armazenamento, dia , calculado por meio da expressão:

$$j = \frac{\mu_d L^2}{\pi^2 K_{ho} D} \quad (6)$$

em que

L = espaçamento entre os drenos, m ; e

K_{ho} = condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, m/dia .

$$D = deq + hm \quad (7)$$

em que

deq = espessura do estrato equivalente de Hooghoudt, m; e

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.

Na primeira simulação, o modelo considera que toda a parcela da precipitação que infiltra atinge o lençol freático.

O valor de deq é calculado por meio da equação:

$$\text{deq} = \frac{D_d}{2,5 \frac{D_d}{L} \ln \frac{D_d}{P_{mo}} + 1} \quad (8)$$

para drenos abertos, e

$$\text{deq} = \frac{L}{8(R_h + R_r)} \quad (9)$$

para drenos cobertos

em que

D_d = distância vertical entre o plano que contém os drenos e a camada impermeável, m;

\ln = logaritmo neperiano;

P_{mo} = perímetro molhado, m;

R_h = resistência hidráulica horizontal, m; e

R_r = resistência hidráulica radial, m.

R_h e R_r são calculados utilizando as equações

$$R_h = \frac{(L - 1,4D_d)^2}{8D_dL} \quad (10)$$

e

$$R_r = \frac{1}{\pi} \ln \frac{0,7D_d}{r} \quad (11)$$

em que r é o raio do tubo de drenagem, m.

Conforme FERREIRA (1998), quando o tubo de drenagem é envolvido por envelope, o valor de r deve ser considerado igual ao raio do conjunto tubo-envelope. Quando o tubo de drenagem não for envolvido por envelope, deve ser utilizado um procedimento para que seja contabilizado o efeito da convergência das linhas de corrente ao penetrarem nas aberturas do tubo de drenagem, que consiste em substituir o raio r por um raio efetivo r_e na equação 11. Alternativas para estimar o r_e são fornecidas por SKAGGS (1978) e Smedema e Rycroft, citados por DUARTE (1997).

No PRODREN, a posição do lençol freático somente não é calculada pela equação de Kraijenhoff Van de Leur – Maasland, nas seguintes circunstâncias:

- a) quando o valor de rec_y for negativo; e
- b) quando o lençol freático no dia anterior estiver abaixo da linha de drenos (hlf negativo) e o valor de hlf calculado para o dia atual não for maior que o módulo de hlf calculado para o dia anterior.

Nesses casos, o valor de hlf no dia atual será calculado pelo seguinte procedimento:

- Quando o valor de hlf calculado para o dia anterior for negativo ou nulo:

$$hlf_y = hlf_y + hlf_{y-1} + \frac{rec_y}{\mu_d} \quad (12)$$

- Quando o valor de hlf calculado para o dia anterior for positivo:

$$hlf_y = hlf_y + \frac{rec_y}{\mu_d} \quad (13)$$

Quando a posição do lençol freático calculada estiver acima da superfície do solo, é feita uma correção do valor de hlf pela equação:

$$hlf_y = \text{profdren} + \mu_d (hlf_y - \text{profdren}) \quad (14)$$

em que

hlf_y = altura do lençol freático real sobre o plano que passa sobre os drenos, ao final do dia "y", em resposta a uma dada recarga, m; e
 profdren = profundidade dos drenos.

3.1.3. Cálculo do fluxo ascendente máximo

Existem diversas maneiras de estimar o fluxo ascendente em função da profundidade do lençol freático. Estas estimativas são aproximadas, por considerá-lo condição permanente, embora ele seja um processo transiente. A literatura apresenta diversas metodologias para estimar o fluxo ascendente para cada tipo de solo, porém a disponibilidade de dados geralmente é pequena.

GARDNER (1957) obteve soluções analíticas para a determinação do fluxo ascendente, em condições de campo, empregando funções de condutividade hidráulica para meio não-saturado.

SKAGGS (1981) descreveu um procedimento numérico para calcular o fluxo vertical ascendente máximo diário em função da profundidade do lençol freático, em condições de escoamento permanente.

No PRODREN, a metodologia utilizada para calcular o fluxo ascendente é similar àquela usada no modelo norte-americano DRAINMOD, descrita por SKAGGS (1981), e no modelo SIMDRENO, conforme DUARTE (1997). Baseia-se na geração de uma tabela que contém valores de fluxo ascendente máximo para diferentes profundidades do lençol freático.

A equação para calcular o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, em qualquer posição abaixo da zona radicular, é a de Darcy-Buckingham:

$$fa = -K(\Psi) \frac{d\Psi}{dz} + K(\Psi) \quad (15)$$

em que

fa = fluxo ascendente oriundo do lençol freático, cm/h;

z = coordenada vertical, positiva para baixo, cm;

Ψ = potencial matricial, cm; e

$K(\Psi)$ = condutividade hidráulica do meio não-saturado, cm/h.

Dividindo-se o perfil do solo em incrementos Δz , a equação 15 pode ser escrita na forma de diferenças finitas, como:

$$fa = -K(\Psi_i) \frac{\Psi_{i+1} - \Psi_i}{\Delta z} + K(\Psi_i) \quad (16)$$

Explicitando-se a equação 16 para Ψ_{i+1} obtém-se

$$\Psi_{i+1} = \Psi_i + \Delta z - fa \frac{\Delta z}{K(\Psi_i)} \quad (17)$$

Nas equações 16 e 17 os valores de Ψ são negativos, assim como os valores de fa , visto que o eixo de coordenadas vertical é orientado para baixo.

O procedimento para obtenção da profundidade do lençol freático correspondente a um determinado valor de fluxo ascendente máximo (fa) consiste das seguintes etapas:

- obter as funções $K(\theta)$ e $\theta(\Psi)$ para o solo em questão;
- estabelecer valores de fa , para os quais serão calculadas as respectivas posições do lençol freático;
- considerar, como condição de contorno, que a umidade do solo junto ao plano que passa pela base da zona radicular é baixa em relação à capacidade de campo. Conforme sugerido por SKAGGS (1981), considera-se $\Psi_1 = - 50$ kPa;
- calcular Ψ_2 pela equação 17, utilizando o valor de $K(-500)$ e um dos valores de fa já estabelecidos;
- calcular Ψ_3 , utilizando o valor de $K(\Psi_2)$ na equação 17, e assim sucessivamente; e
- a posição do lençol freático correspondente ao valor de fa utilizado, tendo como referência a base da zona radicular, é aquela para a qual o valor de $\Psi = 0$. O modelo utiliza incrementos Δz iguais a 1 cm e contabiliza o número de incrementos utilizados para obtenção de $\Psi = 0$.

Os valores de $\theta(\Psi)$ são determinados pelo modelo de GENUCHTEN (1980):

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\beta \cdot \Psi)^\eta]^m} \quad (18)$$

em que

$\theta(\Psi)$ = teor de água, base volume, em equilíbrio com o potencial matricial Ψ , decimal;

θ_r = teor de água residual do solo, base volume, decimal;
 θ_s = teor de água do solo saturado, base volume, decimal;
 m, η = parâmetros adimensionais da equação; e
 β = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} .

Conforme sugerido por GENUCHTEN (1980), Ψ é considerado positivo, na equação 18, para simplificar a notação.

Na equação 18, os parâmetros m, η e β podem ser obtidos mediante o uso do programa computacional para confecção da curva de retenção da água no solo, conforme DOURADO NETO et al. (1990).

Para obtenção de $K(\theta)$, é utilizada a equação baseada no modelo de MUALEM (1976), apresentada por GENUCHTEN (1980), e também utilizada por DUARTE (1997) no modelo SIMDRENO, ou seja:

$$K(\theta) = K_0 \cdot \Theta^{1/2} \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2 \quad (19)$$

em que

$K(\theta)$ = condutividade hidráulica do solo não-saturado, correspondente à umidade θ , cm/h; e

K_0 = condutividade hidráulica do solo saturado, cm/h;

Como se trata de um movimento de água na direção vertical, o valor de K_0 é igualado ao da condutividade hidráulica vertical do solo saturado (K_{vs}).

O parâmetro Θ é obtido pela equação:

$$\Theta = \frac{\theta(\Psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (20)$$

3.1.4. Comparação entre o fluxo ascendente máximo de água no solo e a evapotranspiração real

Nessa etapa, o PRODREN divide a evapotranspiração real (*etr*) em duas frações: uma oriunda do lençol freático (*etlf*) e outra suprida pela zona radicular (*etzr*).

Para cada dia, o modelo determina o valor do fluxo ascendente máximo (fa_{max}) em função da profundidade diária do lençol freático, obtida em cada iteração, utilizando-se a equação de Kraijenhoff Van de Leur - Maasland. Esses valores são calculados por meio da interpolação linear dos dados da tabela de fluxo ascendente e de profundidade do lençol freático, sendo esta tabela obtida segundo o procedimento descrito no item anterior.

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. Sendo assim, $etlf = etr$ e $etzr = 0$.

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:

$$etlf = fa_{max}; \text{ e } etzr = etr - etlf$$

3.1.5. Profundidade efetiva do sistema radicular

Este é um dado de entrada que é fornecido ao programa via leitura de arquivo, ou definindo os dias julianos com seus respectivos valores de profundidade efetiva do sistema radicular (*profr*). Devem também ser fornecidos

o dia do plantio e o dia do final do ciclo (colheita). Por meio de interpolação linear, o PRODREN calcula a profundidade radicular para todos os dias do ano, sendo considerada uma profundidade efetiva radicular de 3 cm naqueles dias em que o solo estiver sem cobertura vegetal.

A *profr* é usada no PRODREN para designar a altura da região do perfil do solo da qual a água pode ser removida, caso necessário, para suprir a demanda de evapotranspiração.

Pelo fato de a água ser extraída em maior quantidade próxima à superfície, a profundidade efetiva deve ser considerada como sendo 60% da profundidade do sistema radicular da cultura, conforme sugerido por SKAGGS (1981).

3.1.6. Balanço hídrico na zona radicular

Nesta etapa, são calculados os seguintes valores:

- arm_y = armazenamento de água na zona radicular no dia “y”, mm;
- etr_y = evapotranspiração real no dia “y”, mm; e
- $pinfl_y$ = parcela da precipitação pluvial que atinge o lençol freático no dia “y”, mm.

Podem ocorrer três situações, conforme a posição do lençol freático calculada em cada iteração:

a) O lençol freático está na superfície do solo, ou formando lençol superficial

A zona radicular está saturada, ou seja, arm_y é igual à profundidade efetiva do sistema radicular multiplicada pelo teor de água volumétrico do solo na saturação (θ_s). A evapotranspiração real é considerada como sendo igual à evapotranspiração potencial. Quando o teor de água na zona radicular no dia anterior for igual ou maior do que o teor de água em equilíbrio com uma tensão de 0,6 mca (θ_{Pd} , que é o teor de água considerado no cálculo da porosidade

drenável), considera-se que toda precipitação que infiltrou atingiu o lençol freático. Caso contrário, $pinfl_y$ é considerada igual à parcela da precipitação que infiltrou no dia "i" ($pinf_y$) menos a lâmina consumida para elevar o teor de água do solo no dia anterior até o θ_{Pd} . Se a $pinfl_y$ obtida for negativa, faz-se $pinfl_y = 0$.

b) O lençol freático está na zona radicular

Para o cálculo de arm_y , considera-se que a parte da zona radicular acima do lençol freático encontra-se com teor de água igual a θ_{Pd} . A evapotranspiração real é considerada como sendo igual à evapotranspiração potencial. A $pinfl_y$ é calculada da mesma forma utilizada para quando o lençol freático encontra-se na superfície do solo ou acima.

c) O lençol freático está abaixo da zona radicular

Neste caso, arm_y é calculado por meio de um balanço hídrico na zona radicular, da seguinte forma:

$$arm_y = arm_{y-1} + pinf_y - etzr_y - pinfl_y \quad (21)$$

em que

arm_{y-1} = lâmina de água armazenada na zona radicular no dia anterior, mm; e

$etzr_y$ = parcela da evapotranspiração oriunda da zona radicular no dia atual, mm.

Caso o valor de arm_y seja superior ao correspondente a θ_{Pd} , ou seja, superior à DR_y (lâmina de água na zona radicular correspondente a θ_{Pd} no dia "y"), faz-se $pinfl_y$ igual a arm_y , diminuído de DR_y , e logo após arm_y igual à DR_y . Em caso contrário, $pinfl_y$ é considerada igual a zero.

A evapotranspiração real é calculada com base no teor de água da zona radicular, utilizando a equação proposta por BERNARDO (1989), isto é:

$$etr_y = \frac{\ln(arm_y - PM_y + 1)}{\ln(CC_y - PM_y + 1)} etp_y \quad (22)$$

em que

PM_y = lâmina de água na zona radicular correspondente ao ponto de murcha permanente no dia “y”, mm;

CC_y = lâmina de água na zona radicular correspondente à capacidade de campo no dia “y”, mm; e

etp_y = evapotranspiração potencial da cultura no dia “y”, mm.

3.1.7. Índices básicos de desempenho do sistema de drenagem

Conforme mencionado anteriormente (subitem 3.1.), o processo iterativo cessa quando são satisfeitas as seguintes condições:

- a diferença absoluta entre os valores de hlf_i calculados em duas iterações consecutivas é menor que 0,001 m; e
- as diferenças absolutas entre os valores de arm_i e etr_i calculados em duas iterações consecutivas são inferiores a 0,01 mm.

É então iniciado o procedimento de cálculo dos índices básicos de desempenho dos sistemas de drenagem para as várias combinações de profundidade de drenos e espaçamento entre eles. Estas combinações constituem dados de entrada fornecidos ao programa pelo usuário, por meio do formulário “Dados do Sistema de Drenagem”.

Os índices básicos de desempenho do sistema de drenagem são:

- soma do excesso de água (SEW); e
- número de dias secos.

Esses índices são utilizados também nos modelos SIMDRENO e DRAINMOD.

Embora tais índices afetem a produtividade da cultura, eles não são suficientes para estimá-la, pois as culturas apresentam diferentes suscetibilidades aos estresses, causados tanto pelo excesso quanto pela falta de água no solo.

3.1.7.1. Soma do excesso de água (SEW_{30})

O SEW_{30} é um índice utilizado para quantificar as condições de excesso de umidade na zona radicular durante o ciclo da cultura. É expresso por:

$$SEW_{30} = \sum_{y=1}^n (30 - \text{proft}_y) \quad (23)$$

em que

SEW_{30} = soma dos excessos diários de água a profundidades menores que 30 cm, cm-dia;

proft_y = profundidade do lençol freático em relação à superfície do solo no dia “y”, cm; e

n = número de dias do ciclo da cultura.

Os termos negativos são negligenciados.

A área sombreada da Figura 2 representa, conceitualmente, o SEW_{30} . O eixo das abcissas representa os dias do ano, considerando o dia 1 como sendo o dia 1º de julho e o dia 365, ou dia zero, como sendo o dia 30 de junho. Nesta representação, o ciclo da cultura inicia-se no dia 100, ou dia 8 de outubro, e termina no dia 230, ou dia 14 de fevereiro. O SEW_{30} pode ser definido pela área entre o lençol freático e a profundidade de 30 cm (área escura) durante o ciclo da cultura.

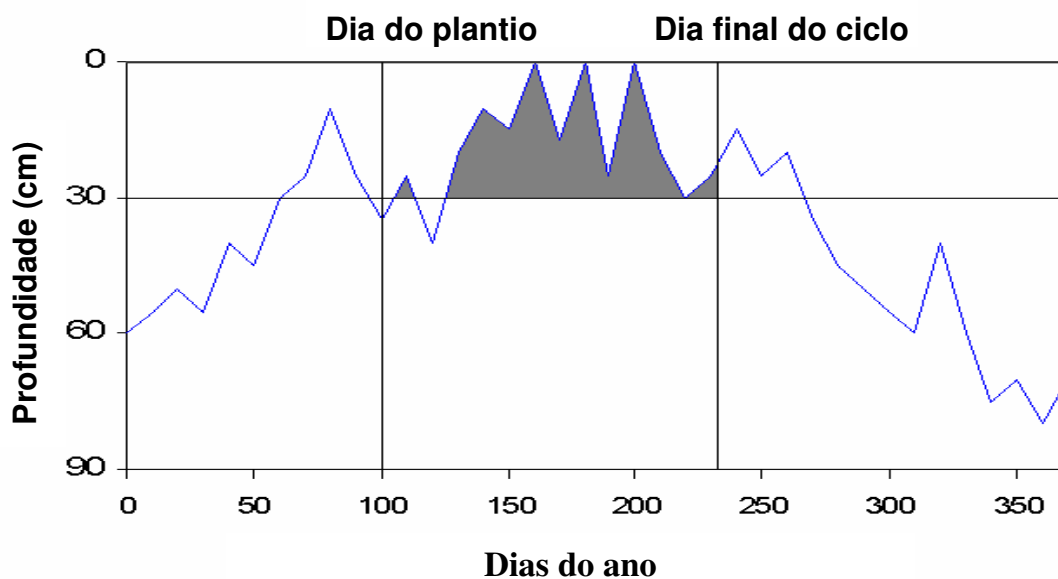


Figura 2 - Gráfico de profundidade do lençol freático *versus* dias do ano.

SKAGGS (1981) comentou que esse conceito, originalmente definido por Sieben, em 1964, considera que o efeito na produtividade da cultura exercido pelo lençol freático situado a 5 cm de profundidade durante um dia é o mesmo que o exercido por um lençol freático situado a 25 cm de profundidade durante cinco dias. De qualquer modo, apesar dos pontos vulneráveis, ele propicia um método conveniente de qualificação da drenagem, tendo sido evidenciados decréscimos na produtividade das culturas a partir de valores de SEW_{30} entre 100 e 200 cm-dias. De modo geral, considera-se que os sistemas de drenagem devem prover valores desse índice inferiores a 100 cm-dias. Algumas culturas, entretanto, são mais sensíveis que outras a condições de drenagem deficiente, devendo o valor de SEW_{30} crítico ser ajustado para cada caso.

A relação entre as produtividades das culturas e o SEW_{30} é mostrada, graficamente, na Figura 3.

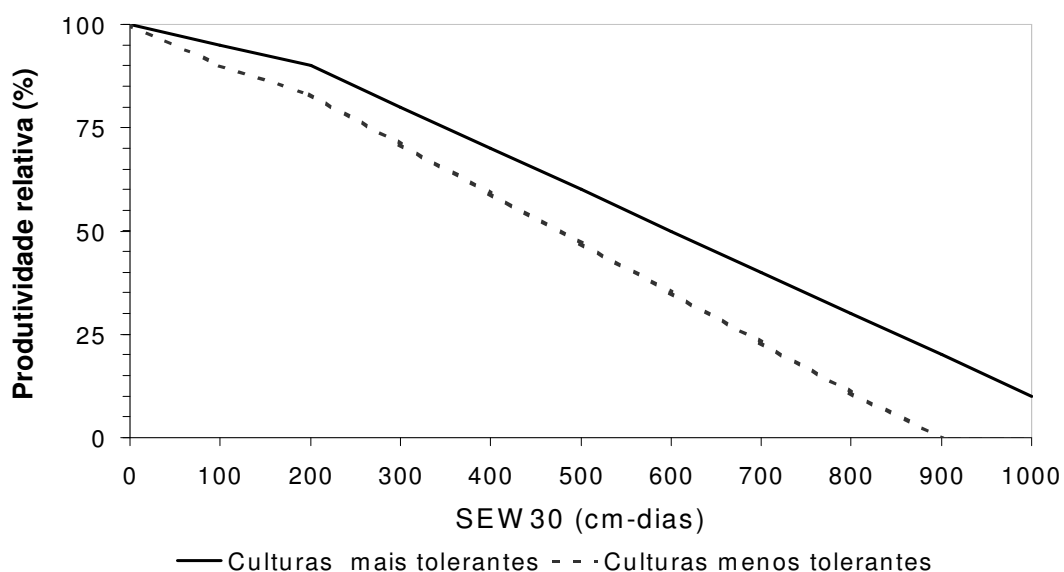


Figura 3 - Representação esquemática dos efeitos do SEW_{30} na produtividade de culturas com diferentes tolerâncias ao excesso de água na zona radicular.

O valor crítico da profundidade, a partir do qual a presença do lençol freático na zona radicular é medida, deve ser adequado a cada cultura. Para a cultura do milho, o valor de 30 cm parece ser apropriado. Outras culturas podem requerer valores diferentes, conforme a extensão do sistema radicular (SKAGGS, 1990).

3.1.7.2. Número de dias secos (NDS)

A definição deste índice no PRODREN é a mesma utilizada no SIMDRENO e no DRAINMOD, segundo a qual um dia seco é aquele no qual a evapotranspiração real é inferior à potencial. Presume-se que esta condição proporcione queda de produtividade das culturas. O NDS é a soma dos dias secos durante o ciclo da cultura. O ideal é que o sistema de drenagem promova um valor mínimo de NDS para prevenir perdas de produtividade devido à deficiência de água no solo (SKAGGS, 1981).

Conforme mencionado, embora esse índice afete a produtividade das culturas, ele não permite uma estimativa generalizada deste efeito, pois ocorrem diferentes sensibilidades das culturas às condições de estresse, devido à falta de água no solo.

3.1.8. Estimativa da produtividade relativa da cultura

Para estimar a produtividade relativa das culturas, foi utilizado um procedimento semelhante ao empregado no SIMDRENO e DRAINMOD. A estimativa foi efetuada para cada ano da simulação. Produtividade relativa é a razão entre a produtividade real e a produtividade potencial, ou produtividade máxima possível de se obter caso a cultura não sofra estresse por falta ou por excesso de água no solo. O PRODREN analisa separadamente os efeitos do excesso e da falta de água sobre a produtividade da cultura, para cada configuração de sistema de drenagem. Posteriormente, efetua a estimativa da produtividade relativa total. A produtividade relativa anual total é calculada utilizando a equação:

$$Y_T = \frac{Y}{Y_o} 100 = \frac{Y_{RW} Y_{RD}}{100} \quad (24)$$

em que

Y_T = produtividade relativa anual total estimada, %;

Y = produtividade anual estimada, kg/ha;

Y_o = produtividade potencial, kg/ha;

Y_{RW} = produtividade relativa anual estimada, caso ocorra estresse devido apenas ao excesso de umidade no solo, %; e

Y_{RD} = produtividade relativa anual estimada, caso ocorra estresse devido apenas à falta de água no solo, %.

Os valores de YRW e YRD são obtidos, empregando-se as relações:

$$YRW = \frac{YW}{Y_0} 100 \quad (25)$$

e

$$YRD = \frac{YD}{Y_0} 100 \quad (26)$$

em que

YW = produtividade anual estimada, caso ocorra estresse devido apenas ao excesso de água no solo, kg/ha; e

YD = produtividade anual estimada, caso ocorra estresse devido apenas à falta de água no solo, kg/ha.

3.1.8.1. Índice diário de estresse (IDS)

O índice diário de estresse foi desenvolvido por HILER (1969), para caracterizar os efeitos do estresse hídrico sobre a produtividade das culturas. O conceito implica encontrar um meio de quantificar o grau de estresse imposto à cultura durante o ciclo fenológico, sendo aplicável para caracterizar os estresses causados tanto pela falta quanto pelo excesso de água no solo. O índice diário de estresse (IDS) pode ser escrito como:

$$IDS = \sum_{y=1}^n SC_y SD_y \quad (27)$$

em que

SC_y = fator de suscetibilidade da cultura a um dado estresse no dia “y”; e

SD_y = fator diário de estresse no dia “y”.

O fator de suscetibilidade da cultura (SC) depende da espécie e de seu estágio de desenvolvimento, indicando a suscetibilidade da cultura a um dado estresse.

3.1.8.2. Produtividade da cultura em resposta ao excesso de água no solo (YRW)

A equação 28, desenvolvida por HARDJOAMIDJOJO et al. (1982), permite estimar a YRW com base no índice diário de estresse:

$$YRW = YRW_{\max} - WSLOPE \text{ IDSw} \quad (28)$$

em que

YRW_{\max} = coeficiente linear da equação, %;

$WSLOPE$ = coeficiente angular da equação, adimensional; e

$IDSw$ = índice diário de estresse devido ao excesso de água no solo, adimensional.

O YRW_{\max} pode ser maior que 100% quando a cultura tolerar algum excesso de água, sem perdas de produtividade.

O $IDSw$ é calculado utilizando a equação:

$$IDSw = \sum_{y=1}^n SCw_y SDw_y \quad (29)$$

em que

SCw_y = fator de suscetibilidade da cultura ao excesso de água no solo no dia “y”; e

SDw_y = fator diário de estresse devido ao excesso de água no solo no dia “y”;

As unidades de SCw_y e SDw_y devem ser tais que IDS_w seja adimensional. Conforme sugerido por SKAGGS (1990), são utilizados no modelo valores diários de SEW_{30} como SDw_y .

3.1.8.3. Produtividade da cultura em resposta à deficiência de água no solo (YRD)

Para calcular a produtividade da cultura em resposta à deficiência de água no solo (*YRD*), foi utilizado o procedimento descrito por Shaw (SKAGGS, 1990; DUARTE, 1997). A equação utilizada foi

$$YRD = YRD_{max} - DSLOPE \cdot IDS_d \quad (30)$$

em que

YRD_{max} = coeficiente linear da equação, %;

$DSLOPE$ = coeficiente angular da equação, adimensional; e

IDS_d = índice diário de estresse devido à falta de água no solo, adimensional.

Por outro lado, a equação que descreve o IDS_d é

$$IDS_d = \sum_{y=1}^n SCd_y \cdot SDd_y \quad (31)$$

em que

SCd_y = fator de suscetibilidade da cultura à falta de água no solo no dia “y”, adimensional; e

SDd_y = fator diário de estresse devido à falta de água no solo no dia “y”, decimal.

O SDd_y foi calculado utilizando a equação

$$SDd_y = 1,0 - \frac{etr_y}{etp_y} \quad (32)$$

3.1.8.4. Produtividades relativas médias (YTm, YRWm e YRDm)

Os valores de produtividade relativa total média (YTm), produtividade relativa média devido ao excesso de água no solo ($YRWm$) e produtividade relativa média devido à deficiência de água no solo ($YRDm$) são calculados pelas médias aritméticas de YT , YTW e YRD , para os anos analisados.

3.1.9. Análise econômica

A análise econômica consiste no cálculo dos índices de *valor presente e relação benefício-custo*.

O procedimento para a execução dessa análise requer, numa etapa inicial, o cálculo de alguns parâmetros relacionados ao sistema de drenagem a ser avaliado, os quais são relacionados a seguir:

- CDS_{sub} = comprimento dos drenos subterrâneos, por hectare, m/ha;
- $CInst_{sub}$ = custo de instalação da rede subterrânea, por hectare, R\$/ha;
- $CImpl$ = custo de implantação do projeto, por hectare, R\$/ha;
- CMS_{sub} = custo de manutenção da rede de drenos subterrâneos, por hectare, R\$/(ha.ano); e
- $CManT$ = custo de manutenção anual total, por hectare, R\$/(ha.ano).

Para que esses cálculos sejam realizados, o PRODREN requer os seguintes dados, que são variáveis com a profundidade dos drenos:

- CSAC = custo de saneamento e abertura dos coletores, R\$/ha;
- CMDSI = custo do metro de dreno subterrâneo instalado, R\$/m;
- CMC = custo de manutenção dos coletores, R\$/(ha.ano); e
- CMRS = custo de manutenção da rede subterrânea de drenos, % do custo de instalação/ano.

Os parâmetros $CDSub$, $CInstSub$, $CImpl$, $CMSub$ e $CManT$ são calculados utilizando as seguintes equações:

$$CDSub = \frac{10.000}{L} \quad (33)$$

$$CInstSub = CDSub \cdot CMDSI \quad (34)$$

$$CImpl = CInstSub + CSAC \quad (35)$$

$$CMSub = CInstSub \cdot \frac{CMRS}{100} \quad (36)$$

$$CManT = CMC + CMSub \quad (37)$$

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

$$VP_x = \sum_{i=0}^{VEcon} \frac{(RA_x - CManT)}{(1 + TJuros)^i} - CImpl \quad (38)$$

em que

VP_x = valor presente, considerando a RA_x , R\$/ha;

VEcon = vida econômica do projeto, anos;

TJuros = taxa de juros anual, decimal; e

RA_x = receita anual no ano “x”, R\$/ha.ano.

A receita anual é calculada utilizando a equação:

$$RA_x = PVenda QP_x - CPCultura \quad (39)$$

em que

PVenda = preço de venda, R\$/saco;

QP_x = quantidade produzida no ano “x”, sacos/ha; e

CPCultura = custo de produção da cultura, R\$/ha.

O valor de QP_x foi calculado utilizando a equação:

$$QP_x = \frac{PPMax \cdot YT_x}{100} \quad (40)$$

em que

YT_x = produtividade relativa anual total estimada para o ano “x”, %; e

PPMax = produção potencial máxima, sacos/ha.

O índice relação benefício-custo é calculado por meio da equação:

$$BC_x = \frac{\sum_{i=1}^{VEcon} \left(\frac{RA_x}{(1 + TJuros)^i} \right)}{\sum_{i=1}^{VEcon} \left(\frac{CManT}{(1 + TJuros)^i} + CImpl \right)} \quad (41)$$

em que BC_x é a relação benefício-custo (adimensional).

Os índices VP_x e BC_x são calculados mediante o uso do valor de RA_x . No entanto, para determinar o espaçamento mais econômico, foi utilizado o critério proposto por WISER et al. (1974), que leva em conta a produtividade relativa total média (YTm) obtida nos vários anos analisados. Neste caso, calcula-se a receita anual média para cada sistema de drenagem, da seguinte forma:

$$RAM = \frac{\sum_{x=1}^{XT} RA_x}{XT} = PVenda \cdot QPm - CPCultura \quad (42)$$

em que

RAM = receita anual média, R\$/ha.ano;

XT = número de anos analisados; e

QPm = quantidade média produzida nos anos analisados, sacos/ha.

QPm é calculado pela equação:

$$QPm = \frac{PPMax \cdot YTm}{100} \quad (43)$$

Em seguida, calculam-se os índices valor presente e relação benefício-custo médios para cada sistema de drenagem avaliado. Este cálculo é efetuado por meio das equações:

$$VPm = \sum_{i=0}^{VEcon} \frac{(RAM - CManT)}{(1 + TJuros)^i} - CImpl \quad (44)$$

$$BCm = \frac{\sum_{i=1}^{VEcon} \left(\frac{RAm}{(1+TJuros)^i} \right)}{\sum_{i=1}^{VEcon} \left(\frac{CManT}{(1+TJuros)^i} + CImpl \right)} \quad (45)$$

em que

VPm = valor presente médio, R\$/(ha.ano); e

BCm = relação benefício-custo média, adimensional.

3.1.10. Fluxograma do PRODREN

A Figura 4 apresenta o fluxograma resumido do PRODREN.

A seguir, apresenta-se a

- Parâmetros de entrada

x = número de ordem do ano ($1 \leq x \leq 30$);

y = dia do ano ($1 \leq y \leq 365$);

w = número de ordem do espaçamento ($1 \leq w \leq 20$);

z = número de ordem da profundidade ($1 \leq z \leq 20$);

$pre(x,y)$ = precipitação total diária, mm;

$see(x,y)$ = lâmina diária de *seepage*, mm;

$etp(x,y)$ = evapotranspiração potencial diária, mm;

$profr(y)$ = profundidade efetiva do sistema radicular no dia “ y ”, cm;

Diain = dia do ano correspondente ao plantio da cultura;

Diafim = dia do ano correspondente à colheita;

θ_s = teor de água, volumétrico, relativo à saturação, decimal;

θ_{CC} = teor de água, volumétrico, relativo à capacidade de campo, decimal;

θ_{PM} = teor de água, volumétrico, relativo ao ponto de murcha permanente, decimal;

θ_{Pd} = teor de água, volumétrico, em equilíbrio com a tensão de 0,6 m.c.a, decimal;

θ_0 = teor de água, volumétrico, no dia zero ou inicial, decimal;

D_{CI} = profundidade da camada impermeável, m;

K_{ho} = condutividade hidráulica horizontal do solo saturado, m/dia;

K_{vs} = condutividade hidráulica vertical do solo saturado, m/dia;

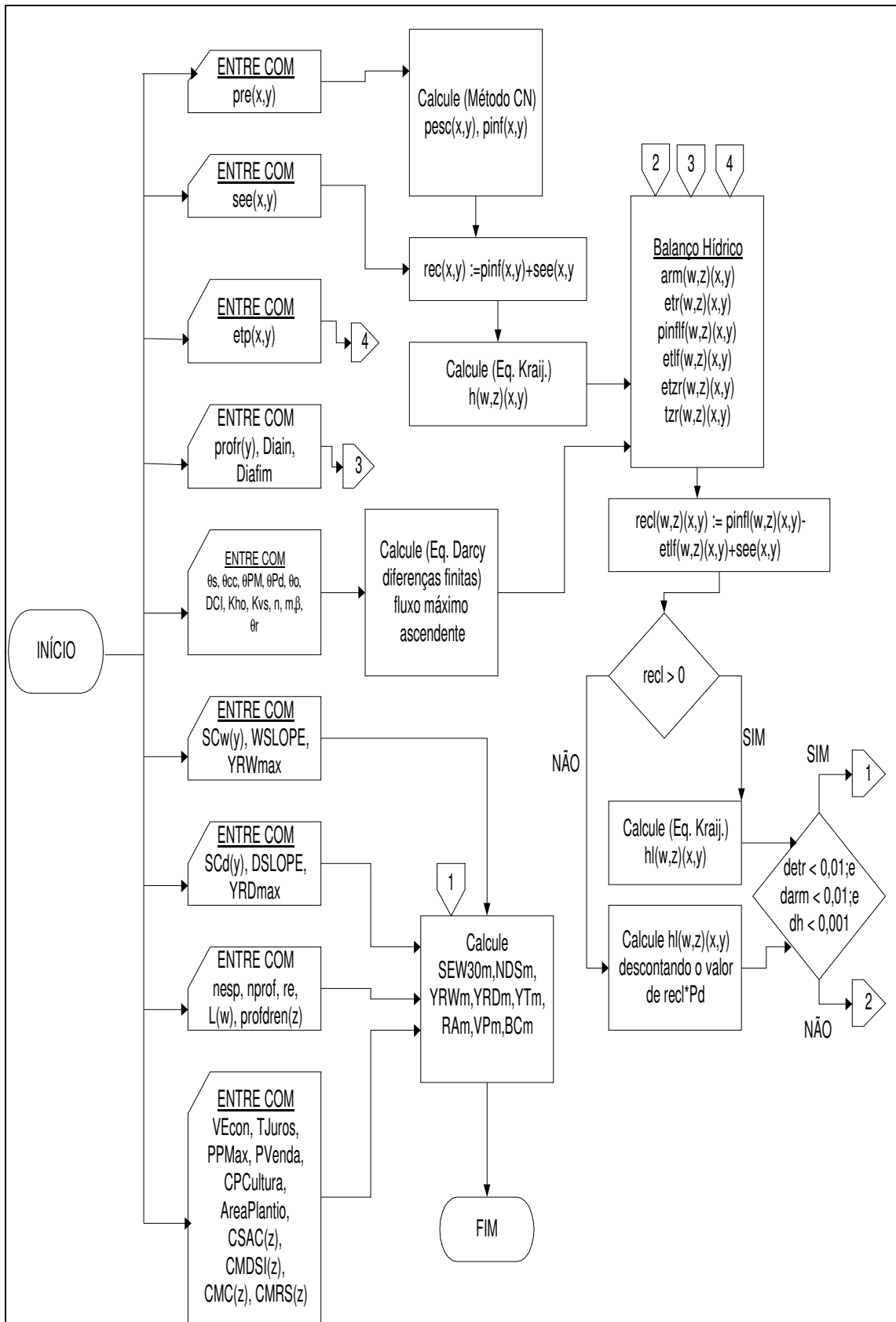


Figura 4 - Fluxograma do PRODREN.

θ_r = teor de água residual do solo, volumétrico, decimal;
 m, η = parâmetros a serem determinados, adimensionais;
 β = parâmetro com dimensão igual ao inverso da tensão, cm^{-1} ;
 SCw_y = fator de suscetibilidade da cultura ao excesso de água no solo no dia “y”, adimensional;
 $WSLOPE$ = coeficiente angular da equação 28, adimensional;
 YRW_{max} = coeficiente linear da equação 28, adimensional;
 SCd_y = fator de suscetibilidade da cultura à falta de água no solo no dia “y”, adimensional.
 $DSLOPE$ = coeficiente angular da equação 30, adimensional;
 YRD_{max} = coeficiente linear da equação 30, adimensional;
 n_{esp} = número de espaçamentos entre drenos a serem testados;
 n_{prof} = número de profundidades de drenos a serem testadas;
 r_e = raio efetivo dos drenos, m;
 $L(w)$ = espaçamentos entre drenos a serem testados, m;
 $Prof_{dren}(z)$ = profundidades de drenos a serem testadas;
 VE_{con} = vida econômica do projeto, anos;
 TJ_{uros} = taxa de juros anual, %;
 PP_{Max} = produção potencial máxima, sacos/ha;
 PV_{enda} = preço de venda, R\$/saco;
 CPC_{ultura} = custo de produção da cultura, R\$/ha;
 $Area_{Plantio}$ = área de plantio, ha;
 $CSAC(z)$ = custo de saneamento e abertura dos coletores, para profundidade de drenos $prof_{dren}(z)$, R\$/ha;
 $CMDSI(z)$ = custo do metro de dreno subterrâneo instalado, para profundidade de drenos $prof_{dren}(z)$, R\$/m;
 $CMC(z)$ = custo de manutenção dos coletores, para profundidade de drenos $prof_{dren}(z)$, R\$/ha.ano; e
 $CMRS(z)$ = custo de manutenção da rede subterrânea de drenos, para profundidade de drenos $prof_{dren}(z)$, % do custo de instalação/ano.

- Parâmetros de saída

SEW_{30m} = SEW_{30} anual médio;

$NDSm$ = número de dias secos anual médio;

$YRWm$ = produtividade relativa devido ao excesso de água no solo, média, %;

$YRDm$ = produtividade relativa devido à falta de água no solo, média, %;

YTm = produtividade relativa total média, %;

RAm = receita anual média, R\$/ha;

VPm = valor presente anual médio, R\$/ha; e

BCm = relação benefício-custo anual média, adimensional.

- Parâmetros de processamento

$pesc(x,y)$ = parcela da precipitação diária que escoia superficialmente, mm;

$pinf(x,y)$ = parcela da precipitação diária que infiltra no solo, mm;

$rec(x,y)$ = recarga efetiva do lençol freático calculada antes do “loop”, m;

$h(w,z)(x,y)$ = altura do lençol freático sobre o plano que contém os drenos, ao final do dia “y”, em resposta a uma dada recarga, calculada antes do “loop”, m;

$arm(w,z)(x,y)$ = lâmina armazenada diária na zona radicular, mm;

$etr(w,z)(x,y)$ = evapotranspiração real diária, mm;

$pinfl(w,z)(x,y)$ = parcela da precipitação diária que infiltra e atinge o lençol, mm;

$etlf(w,z)(x,y)$ = parcela da evapotranspiração real diária oriunda do lençol, mm;

$etZR(w,z)(x,y)$ = parcela da evapotranspiração real oriunda da zona radicular, mm;

$tZR(w,z)(x,y)$ = teor de água, volumétrico, diário, da zona radicular, decimal;

$recl(w,z)(x,y)$ = recarga efetiva do lençol freático calculada após o “loop”, m;

$hl(w,z)(x,y)$ = altura do lençol freático sobre o plano que contém os drenos, ao final do dia “y”, em resposta a uma dada recarga, calculada após o “loop”, m;

P_d = porosidade drenável (μ_d), decimal;

$detr$ = diferença entre os valores de $etr(w,z)(x,y)$ calculados em duas iterações consecutivas, mm;

$darm$ = diferença entre os valores de $arm(w,z)(x,y)$ calculados em duas iterações consecutivas, mm; e

dh = diferença entre os valores de $hl(w,z)(x,y)$ calculados em duas iterações consecutivas, m.

3.2. Comparação do rebaixamento simulado do lençol freático pelo PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD

A comparação objetiva esclarecer alguns aspectos que influenciam o desempenho dos modelos.

As simulações compreenderam um período de 50 dias de rebaixamento, e a profundidade inicial foi tomada igual a zero. Foram utilizadas as características do solo de textura argilosa (solo 2), apresentadas no Quadro 2.

A profundidade dos drenos foi de 1,2 m e os espaçamentos, de 10, 30 e 50 m. Foi considerada uma evapotranspiração potencial (etp) igual a 5 mm/dia. Considerou-se a inexistência de chuvas durante o período. A profundidade do sistema radicular utilizada foi de 30 cm.

Os resultados das simulações feitas pelo SIMDRENO e pelo DRAINMOD foram obtidos de DUARTE (1997). Os resultados relativos ao SIMDRENO foram calculados pela equação de Kraijenhoff Van de Leur – Maasland.

Quadro 2 - Teores volumétricos de água relativos à saturação (θ_s), capacidade de campo (θ_{CC}), ponto de murcha permanente (θ_{PM}) e teor volumétrico de água em equilíbrio com uma tensão de 0,6 m.c.a. (θ_{Pd})

| Teor de Água | θ_s | θ_{CC} | θ_{PM} | θ_{Pd} |
|-----------------------|------------|---------------|---------------|---------------|
| Franco-argiloso | 0,572 | 0,372 | 0,189 | 0,434 |
| Argila | 0,645 | 0,546 | 0,444 | 0,577 |
| Franco-argilo-siltoso | 0,494 | 0,427 | 0,329 | 0,443 |

3.3. Comparação entre produtividades relativas médias esperadas e análises econômicas obtidas por simulações feitas pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD

Os resultados das simulações feitas pelo SIMDRENO e pelo DRAINMOD são apresentados em DUARTE (1997), e a base de dados utilizada nas simulações efetuadas pelo PRODREN foi a mesma do referido trabalho, ou seja:

a) Clima

Foram utilizadas as séries de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial da região de Piracicaba, para o período de 1974 a 1994, num total de 21 anos.

b) *Seepage*

Nas simulações feitas pelos três modelos, foi considerada uma lâmina nula de *seepage*.

c) Solo

Foram feitas simulações para três tipos de solo, com características distintas. Estes solos têm a seguinte classificação quanto à textura:

- solo 1: franco-argiloso;
- solo 2: argila; e
- solo 3: franco argilo-siltoso.

O Quadro 2 apresenta, para esses três solos, os teores volumétricos de água relativos à saturação (θ_s), à capacidade de campo (θ_{CC}), ao ponto de murcha permanente (θ_{PM}) e ao teor volumétrico de água em equilíbrio com uma tensão de 0,6 m.c.a. (θ_{Pd}), que foi utilizado no cálculo da porosidade drenável.

No Quadro 3, estão relacionadas as condutividades hidráulicas horizontais e verticais do solo saturado, K_{ho} e K_{vs} , respectivamente.

Quadro 3 - Condutividades hidráulicas horizontais e verticais do solo saturado

| Condutividade Hidráulica | K_{ho} (m/dia) | K_{vs} (m/dia) |
|--------------------------|------------------|------------------|
| Franco-argiloso | 1,00 | 0,50 |
| Argila | 0,50 | 0,25 |
| Franco-argilo-siltoso | 0,10 | 0,05 |

O Quadro 4 apresenta os parâmetros necessários ao modelo de GENUCHTEN (1980).

Quadro 4 - Parâmetros do modelo de Genuchten

| Parâmetros | θ_s | θ_r | m | η | β |
|-----------------------|------------|------------|--------|--------|---------|
| Franco-argiloso | 0,572 | 0,112 | 0,2117 | 1,2685 | 0,0538 |
| Argila | 0,645 | 0,363 | 0,1532 | 1,1809 | 0,0654 |
| Franco-argilo-siltoso | 0,494 | 0,073 | 0,0633 | 1,0676 | 0,1010 |

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

O valor do teor de água inicial do solo (θ_0), isto é, o teor de água 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 θ_0 a θ_{pd} . A altura inicial do lençol freático em relação ao plano que contém os drenos (h_{lf_0}) foi considerada de 0,6 m. Ressalta-se a influência praticamente nula dos parâmetros θ_0 e altura inicial do lençol freático sobre os resultados, devido à extensão do período em que a simulação foi feita.

c) Escoamento superficial

As análises foram feitas para situações em que se considera ou não o escoamento superficial. Como o SIMDRENO e o PRODREN não consideram o efeito da variação do espaçamento entre os drenos sobre o escoamento superficial, foi utilizado o procedimento proposto por DUARTE (1997), que utilizou 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 os 20 espaçamentos propostos. Calculou-se então, para cada tipo de solo, o valor do coeficiente CN 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.

d) Cultura

Considerou-se a cultura de milho, plantada no dia 8 de outubro e colhida no dia 14 de fevereiro, totalizando um ciclo de 130 dias. Os dados de variação da profundidade efetiva do sistema radicular e os coeficientes de estresse da cultura foram os mesmos utilizados por DUARTE (1997).

e) 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; e
- diâmetro efetivo de drenos de 0,1 m.

f) Dados econômicos

O cálculo do *valor presente* foi feito, utilizando os dados:

- VEcon = vida econômica do projeto, 25 anos;
- TJuros = taxa de juros anual, 12%;
- PPMax = produção potencial máxima, 200 sacos/ha;
- PVenda = preço de venda do saco, R\$ 6,50/saco;
- CPCultura = custo de produção da cultura, R\$ 600,00/ha;
- AreaPlantio = área de plantio, 1 ha;
- CSAC = custo de saneamento e abertura dos coletores, R\$ 350,00/ha;
- CMDSI = custo do metro de dreno subterrâneo instalado, R\$ 5,00/m;
- CMC = custo de manutenção dos coletores, R\$ 10,50/(ha.ano). O critério adotado foi o de considerar o *CMC* igual a 3% do valor de *CSAC*; e
- CMRS = custo de manutenção da rede subterrânea de drenos, correspondente a 0,5% do custo de instalação/ano.

3.4. Comparações entre dimensionamentos realizados com base no balanço hídrico e nos critérios econômicos e aqueles com base nos critérios de drenagem tradicionais

Os espaçamentos obtidos com a aplicação do DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN, para os três tipos de solo, foram comparados com os obtidos com a utilização dos critérios preconizados por PIZARRO (1978) e CRUCIANI (1987), para situações em que se considera ou não o escoamento superficial.

Na metodologia proposta por PIZARRO (1978), 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 estabilizar 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. Tal fato implica uma lâmina de 45,9 mm para a região de Piracicaba. Neste critério, não é considerado o escoamento superficial, ou seja, considera-se que toda precipitação 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 horas, com período de retorno igual a cinco anos. Para a região de Piracicaba, essa precipitação é de 106 mm. Para 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 1, 2 e 3, respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Apresentação da interface do PRODREN

4.1.1. Formulários para entrada de dados

Aqui são descritos os formulários para entrada de dados no PRODREN. Estes formulários são acessados no programa por meio do menu “Entrada de Dados”, presente no formulário principal (Figura 5).

4.1.1.1. Dados climáticos

A entrada de dados é feita via leitura de arquivos de dados diários de precipitação e evapotranspiração potencial, em milímetros, mas pode também ser feita por meio de digitação de dados. Cada arquivo a ser lido deve ser constituído de dados referentes ao período de um ano (365 dados). Estes procedimentos são feitos com o uso dos formulários “Dados de Precipitação” e “Dados de Evapotranspiração”, que são semelhantes tanto na forma de apresentação quanto no procedimento operacional. A Figura 6 apresenta o formulário de entrada de dados de precipitação.

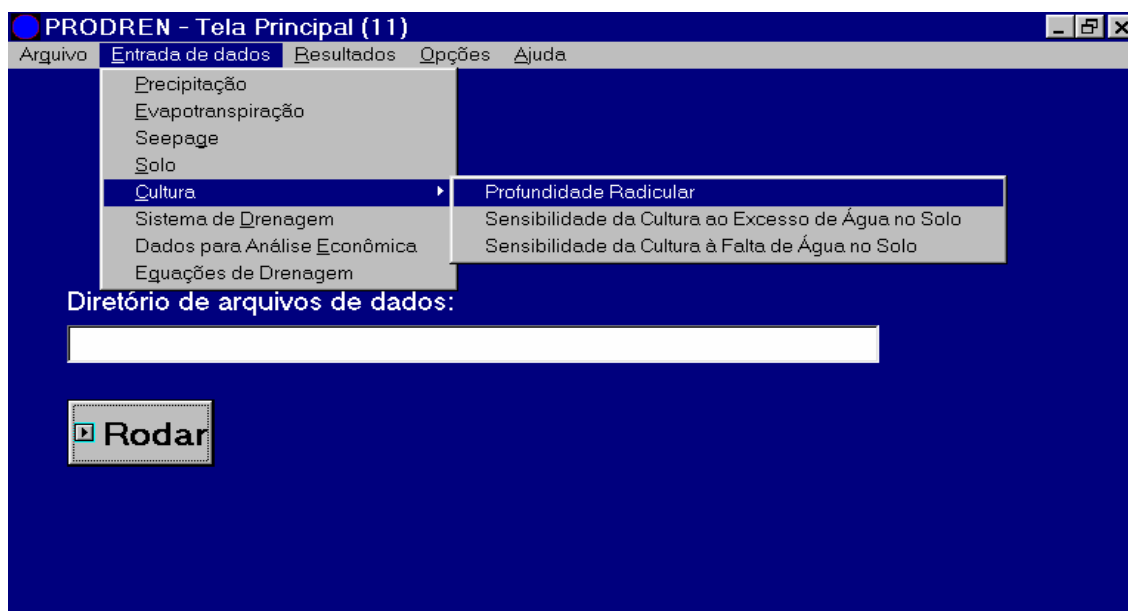


Figura 5 - Formulário principal do PRODREN.

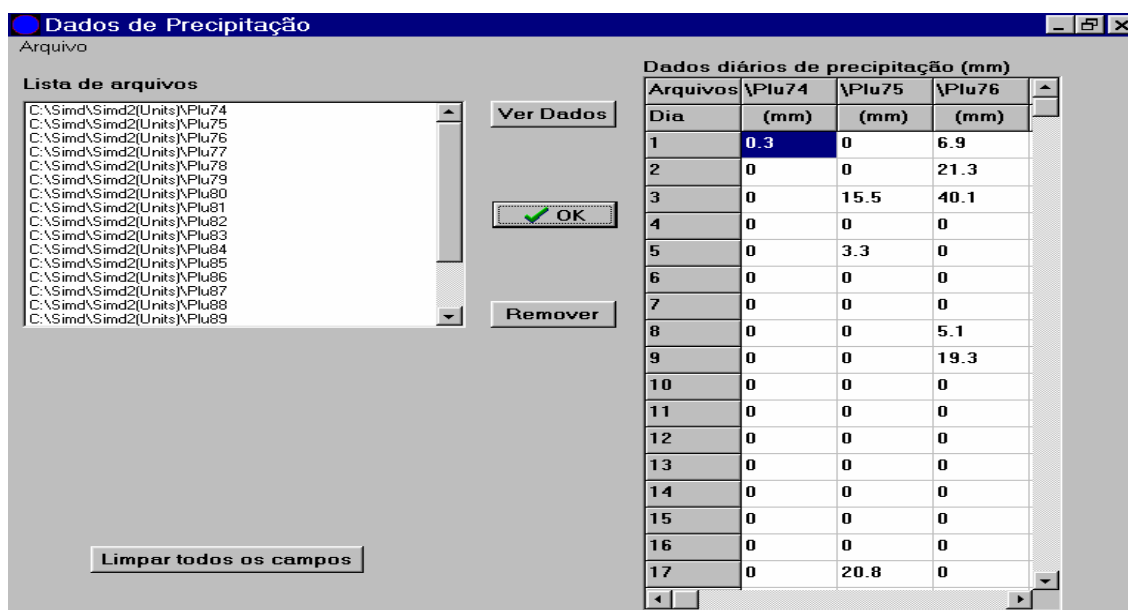


Figura 6 - Formulário “Dados de Precipitação”.

4.1.1.2. Dados de *seepage*

A entrada de dados de *seepage* no PRODREN, em milímetros, pode ser feita via leitura de arquivo, digitação de dados diários ou estabelecendo-se uma lâmina diária constante. Cada arquivo a ser lido deve ser constituído de dados diários referentes a um período de um ano (365 dados). A Figura 7 mostra o formulário “Dados de *Seepage*”.

| Dados diários de "seepage" (mm) | | | |
|---------------------------------|------|------|------|
| Arquivos | 1 | 2 | 3 |
| Dia | (mm) | (mm) | (mm) |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 |

Figura 7 - Formulário “Dados de *Seepage*”.

4.1.1.3. Dados relativos ao solo

Em relação às propriedades físicas do solo, são requeridos os seguintes dados: θ_S , θ_{CC} , θ_{PM} , θ_{Pd} , K_{ho} e K_{vs} . Também são necessários os parâmetros requeridos pelo modelo de GENUCHTEN (1980): θ_r , m , η , β , D_{CI} e θ_0 .

No PRODREN, a entrada desses dados é feita por digitação, mediante o uso do formulário “Dados do Solo”, apresentado na Figura 8. Este formulário já contém dados para três tipos de solo. Caso o usuário queira trabalhar com outro

tipo de solo, basta que seja selecionada a opção “Outros”, no campo “Tipos de Solo”.

Dados do Solo

Tipos de Solo

- Franco-argiloso (Kh = 1.0 m/dia)
- Argila (Kh = 0,5 m/dia)
- Franco-argiloso-siltoso (Kh = 0,1 m/dia)
- Outros

ES - Escoamento Superficial

- Sem ES
- Com ES

CN - Número da Curva

Classes de Umidade

| AMC I | AMC II | AMC III |
|-------|--------|---------|
| 40 | 60 | 78 |

Fluxo Ascendente Máximo

Calcular

Digitar

Ver tabela

Dados do solo

| | |
|---------|-------|
| TetaS | 0.572 |
| Teta60 | 0.434 |
| TetaPMP | 0.189 |
| Teta0 | 0.434 |
| Dci | 5.0 |
| Kho | 1.00 |
| Kvs | 0.5 |
| TetaCC | 0.372 |

Parâmetros do modelo de GENUCHTEN

| | |
|---------------|--------|
| n | 1.2685 |
| m | 0.2117 |
| Beta | 0.0538 |
| Teta residual | 0.112 |
| L | 0.5 |

Limpar OK

OBS:

- Teta = Teor de água, volumétrico (decimal);
- Dci = Profundidade da camada impermeável em relação à superfície do solo (m);
- Kho = Condutividade hidráulica horizontal (m/dia);
- Kvs = Condutividade hidráulica vertical do solo saturado (m/dia).

Figura 8 - Formulário “Dados do Solo”.

A tabela de fluxo ascendente máximo (subitem 3.1.3.) pode ser gerada por meio dos dados fornecidos ou digitada. Neste caso, deve-se ativar o botão “Digitar”, do campo “Fluxo Ascendente Máximo”.

4.1.1.4. Dados de escoamento superficial

Quando o escoamento superficial é considerado, são requeridos os valores CN, conforme a condição inicial de umidade do solo. Estes dados são também fornecidos ao programa por meio do formulário “Dados do Solo” (Figura 8).

4.1.1.5. Dados relativos à cultura

Os dados referentes à cultura são a profundidade efetiva do sistema radicular ($prof_r(y)$) e a sensibilidade da cultura ao excesso e à falta de água no solo.

No subitem 3.1.5., comentou-se sobre o emprego dos dados de $prof_r$ e o procedimento de entrada desses dados. A Figura 9 apresenta o formulário de entrada desses dados.

| Dia | (cm) |
|-----|------|
| 98 | 3.00 |
| 99 | 3.00 |
| 100 | 3.00 |
| 101 | 3.23 |
| 102 | 3.47 |
| 103 | 3.70 |
| 104 | 3.93 |
| 105 | 4.17 |
| 106 | 4.40 |
| 107 | 4.63 |
| 108 | 4.87 |
| 109 | 5.10 |
| 110 | 5.33 |
| 111 | 5.57 |
| 112 | 5.80 |
| 113 | 6.03 |

Figura 9 - Formulário “Dados de Profundidade Efetiva do Sistema Radicular”.

Os dados de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo são fornecidos ao programa por meio do formulário apresentado na Figura 10. São eles: $WSLOPE$, YRW_{max} e SCw_y .

O formulário para entrada de dados de sensibilidade da cultura à deficiência de água no solo é similar ao apresentado na Figura 10. São requeridos os seguintes dados: $DSLOPE$, YRD_{max} e SCd_y .

Os valores de SCw_y e SCd_y são fornecidos ao programa via leitura de arquivo ou digitação direta.

Sensibilidade da Cultura ao Excesso de Água no Solo

Arquivo

Arquivo:

WSLOPE: (adimensional)

YRWmax: (adimensional)

Dia do plantio:

Dia do final do ciclo:

OBS:

- Csw(y) - Fator de sensibilidade da cultura ao excesso de água no solo (adimensional);
- WSLOPE - Coeficiente angular da relação entre Produtividade Relativa e Índice Diário de Estresse;
- YRWMAX - Coeficiente linear da relação entre Produtividade Relativa e Índice Diário de Estresse.

| Dia | SCw |
|-----|------|
| 101 | 0.2 |
| 102 | 0.2 |
| 103 | 0.2 |
| 104 | 0.2 |
| 105 | 0.2 |
| 106 | 0.2 |
| 107 | 0.2 |
| 108 | 0.2 |
| 109 | 0.2 |
| 110 | 0.21 |
| 111 | 0.21 |
| 112 | 0.21 |
| 113 | 0.21 |
| 114 | 0.21 |
| 115 | 0.21 |
| 116 | 0.21 |

Figura 10 - Formulário “Sensibilidade da Cultura ao Excesso de Água no Solo”.

4.1.1.6. Dados relativos ao sistema de drenagem

Por meio do formulário “Dados do Sistema de Drenagem”, são fornecidos, por digitação, os dados relativos ao sistema de drenagem em questão. Pode-se optar por trabalhar com drenos abertos, com seção transversal trapezoidal, ou com drenos fechados. São requeridos os seguintes dados: n_{esp} , n_{prof} , re , $L(w)$ e $profdren(z)$.

Quando o sistema de drenagem é de drenos abertos, são necessários os seguintes dados relativos à geometria da seção transversal do dreno: bm e mt .

O formulário para entrada de dados relativos ao sistema de drenagem é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Formulário "Dados do Sistema de Drenagem".

4.1.1.7. Dados para análise econômica

Os dados de entrada requeridos para a execução da análise econômica são digitados diretamente no formulário apresentado na Figura 12. São eles: *VEcon*, *TJuros*, *PPMax*, *PVenda*, *CPCultura* e *AreaPlantio*.

São também requeridos os seguintes dados referentes aos custos de implantação e manutenção do projeto, que são variáveis com a profundidade dos drenos: *CSAC(z)*, *CMDSI(z)*, *CMC(z)* e *CMRS(z)*.

4.1.2. Formulários de resultados

Neste subitem, são descritos os formulários do PRODREN que apresentam os resultados das simulações. Os formulários são acessados no programa por meio do menu "Resultados", presente no formulário principal (Figura 5).

Dados para Análise Econômica

25 Vida econômica do projeto (anos)

12 Taxa de juros anual (%)

200 Produção potencial máxima (sacos/ha)

6.50 Preço de venda (R\$/saco)

600.00 Custo de produção da cultura (R\$/ha)

0.8100 Área de plantio (ha)

CSAC Custo de saneamento e abertura dos coletores (R\$/ha)

CMDSI Custo do metro de dreno subterrâneo instalado (R\$/m)

CMC Custo de manutenção dos coletores (R\$/ha.ano)

CMRS Custo de manutenção da rede subterrânea (% do custo de instalação/ano)

Custos variáveis com a profundidade (Prof) de instalação dos drenos (m):

| Prof | CSAC | CMDSI | CMC | CMRS |
|------|--------|-------|-------|------|
| 1.2 | 350.00 | 5.00 | 10.50 | 0.50 |
| 1.4 | 360.00 | 5.50 | 10.80 | 0.50 |
| 1.6 | 370.00 | 6.00 | 11.10 | 0.50 |

OK

Figura 12 - Formulário “Dados para Análise Econômica”.

4.1.2.1. Parâmetros de desempenho do sistema de drenagem

Por meio do formulário “Parâmetros Médios” são acessados os parâmetros de desempenho do sistema de drenagem, isto é, SEW_{30m} , $NDSm$, $YRWm$, $YRDm$, YTm , RAm , VPm e BCm , calculados para cada configuração do sistema, ou seja, para cada espaçamento e profundidade de drenos. Este formulário é apresentado na Figura 13.

4.1.2.2. Acompanhamento de variáveis

No formulário “Acompanhamento de Variáveis”, mostrado na Figura 14, são acessados os valores diários das variáveis envolvidas no balanço hídrico e da altura do lençol freático, para cada configuração do sistema de drenagem.

Parâmetros Médios

Profundidades (m): 1.2, 1.4, 1.6

Profundidade: 1.2

OK

| Esp. (m) | SEW30 (cm-dia) | NDS (dias) | YRW (%) | YRD (%) | YRT (%) | R. Anual (R\$/ha) | VP (R\$/ha) | Rel.B/C (decimal) |
|----------|----------------|------------|---------|---------|---------|-------------------|-------------|-------------------|
| 5 | 0.00 | 77.81 | 100.00 | 81.60 | 81.60 | 460.82 | -6809.95 | 0.33 |
| 10 | 0.00 | 77.81 | 100.00 | 81.60 | 81.60 | 460.83 | -1588.71 | 0.64 |
| 15 | 0.00 | 77.57 | 100.00 | 81.86 | 81.86 | 464.15 | 180.96 | 0.93 |
| 20 | 0.00 | 77.38 | 100.00 | 82.01 | 82.01 | 466.12 | 1068.54 | 1.21 |
| 25 | 0.00 | 76.90 | 100.00 | 82.17 | 82.17 | 468.26 | 1609.57 | 1.46 |
| 30 | 0.00 | 76.33 | 100.00 | 82.30 | 82.30 | 469.95 | 1972.64 | 1.70 |
| 35 | 2.24 | 75.29 | 99.95 | 82.47 | 82.43 | 471.58 | 2235.67 | 1.93 |
| 40 | 27.03 | 73.43 | 99.17 | 82.93 | 82.23 | 468.97 | 2399.04 | 2.12 |
| 45 | 71.08 | 72.48 | 97.41 | 83.18 | 80.99 | 452.81 | 2401.21 | 2.24 |
| 50 | 130.59 | 71.76 | 95.01 | 83.30 | 79.06 | 427.81 | 2296.09 | 2.28 |

Figura 13 - Formulário “Parâmetros Médios”.

Acompanhamento de Variáveis

Variável: hlr (m) - Altura corrigida do LF;

Arquivos: 80, 81, 82

Diário: 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202

Espaçamentos (m): 5, 10, 15

Profundidades (m): 1.2, 1.4, 1.6

Espaçamento: 50

Profundidade: 1.2

Ver Dados

OK

Kcon: 0

kcont: 0

| Arquivos | 80 (m) | 81 (m) | 82 (m) |
|----------|--------|--------|--------|
| 188 | -0.336 | 0.095 | 0.230 |
| 189 | -0.276 | 0.787 | 0.215 |
| 190 | -0.228 | 0.834 | 0.200 |
| 191 | -0.229 | 0.803 | 0.187 |
| 192 | -0.109 | 1.101 | 0.174 |
| 193 | -0.087 | 1.051 | 0.162 |
| 194 | -0.062 | 0.993 | 0.151 |
| 195 | 0.268 | 0.945 | 0.141 |
| 196 | 0.470 | 0.899 | 0.131 |
| 197 | 0.454 | 0.841 | 0.122 |
| 198 | 0.442 | 0.788 | 0.114 |
| 199 | 0.423 | 0.735 | 0.106 |
| 200 | 0.487 | 0.686 | 0.100 |
| 201 | 0.706 | 0.639 | 0.093 |
| 202 | 0.954 | 0.596 | 0.086 |

Figura 14 - Formulário “Acompanhamento de Variáveis”.

4.1.2.3. Gráficos

Acessando o menu “Gráficos” dentro do menu “Resultados”, tem-se à disposição alguns formulários que apresentam gráficos relativos aos resultados das simulações. A Figura 15 mostra o formulário “ YT_m , YRW_m , YRD_m x Espaçamento”, em que se observa a variação das produtividades relativas médias com o espaçamento entre os drenos, para uma determinada profundidade de drenos.

Já na Figura 16, é apresentado o formulário “Valor Presente e Produtividade Relativa x Espaçamento”, no qual pode ser acessado o gráfico da variação do VP_m e YT_m com o espaçamento entre os drenos, para uma determinada profundidade de drenos.

O formulário “Gráfico de Variáveis”, mostrado na Figura 17, apresenta, graficamente, as variáveis relacionadas ao balanço hídrico e à altura do lençol freático. Nesse formulário, o usuário deve escolher uma configuração do sistema de drenagem e o ano para os quais ele deseja verificar a variação de uma determinada variável.

4.1.2.4. Combinação de espaçamento e profundidade de drenos que propicia o maior retorno econômico

A configuração do sistema de drenagem que propicia o maior retorno, segundo o aspecto econômico, é acessada por meio do formulário “Conclusões sobre o Dimensionamento”, que também fornece os valores esperados de YT_m e VP_m (Figura 18).

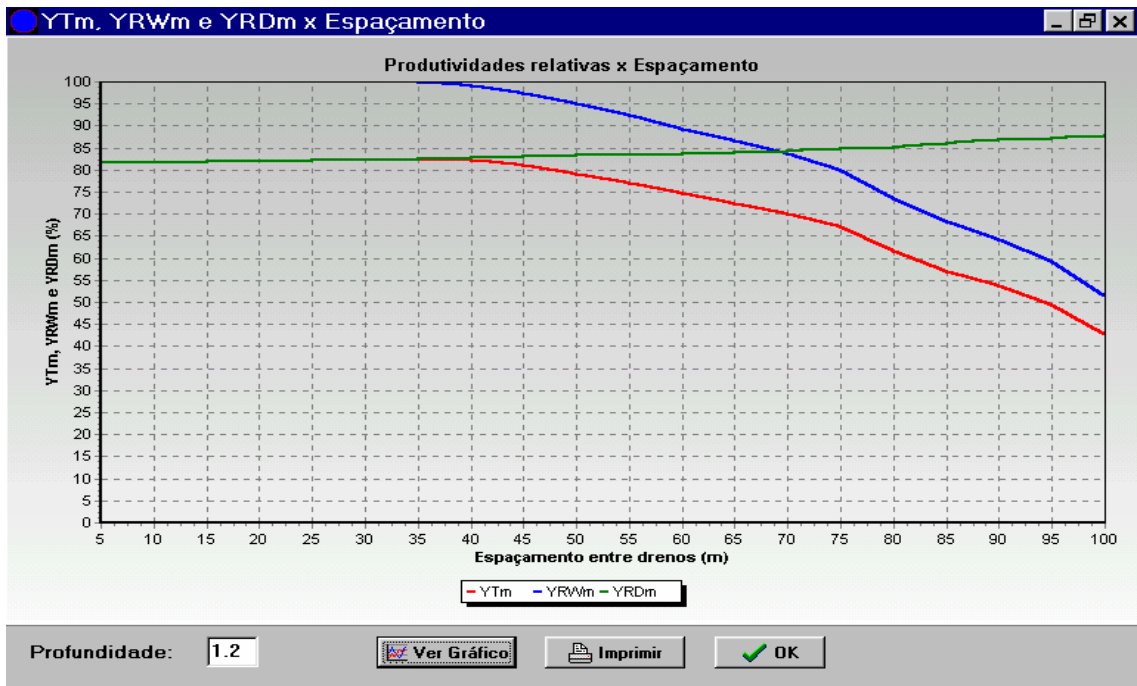


Figura 15 - Formulário “YTm, YRWm, YRDm *versus* Espaçamento”.

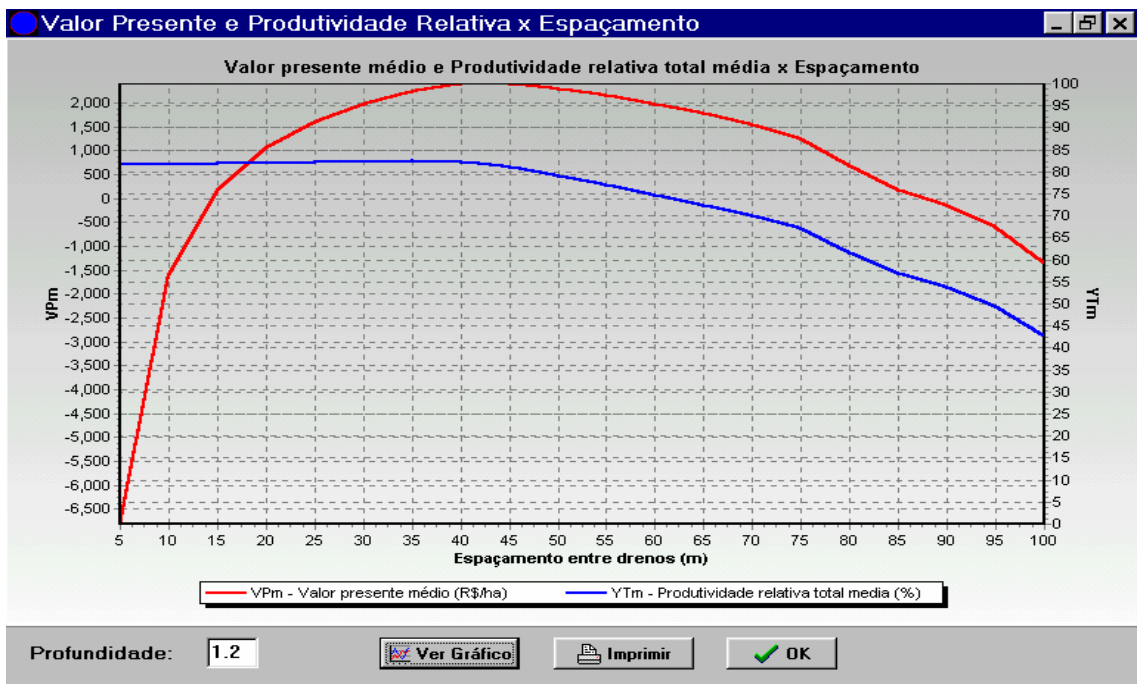


Figura 16 - Formulário “Valor Presente e Produtividade Relativa *versus* Espaçamento”.

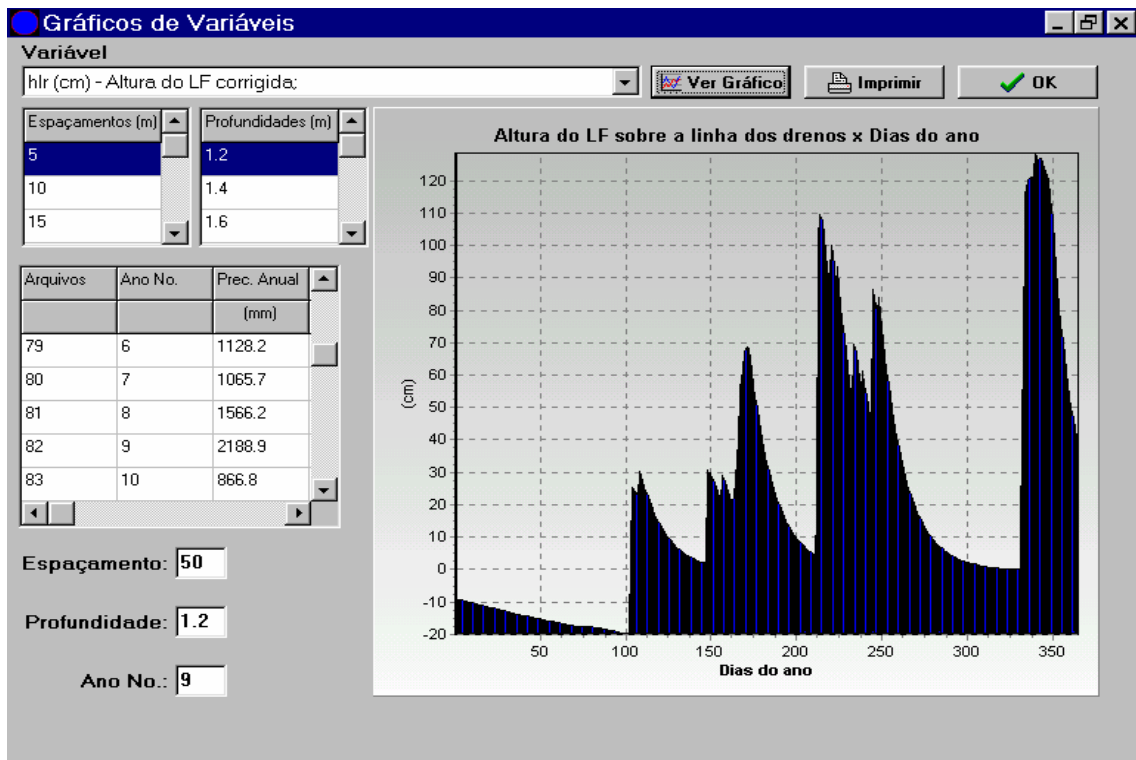


Figura 17 - Formulário “Gráfico de Variáveis”.

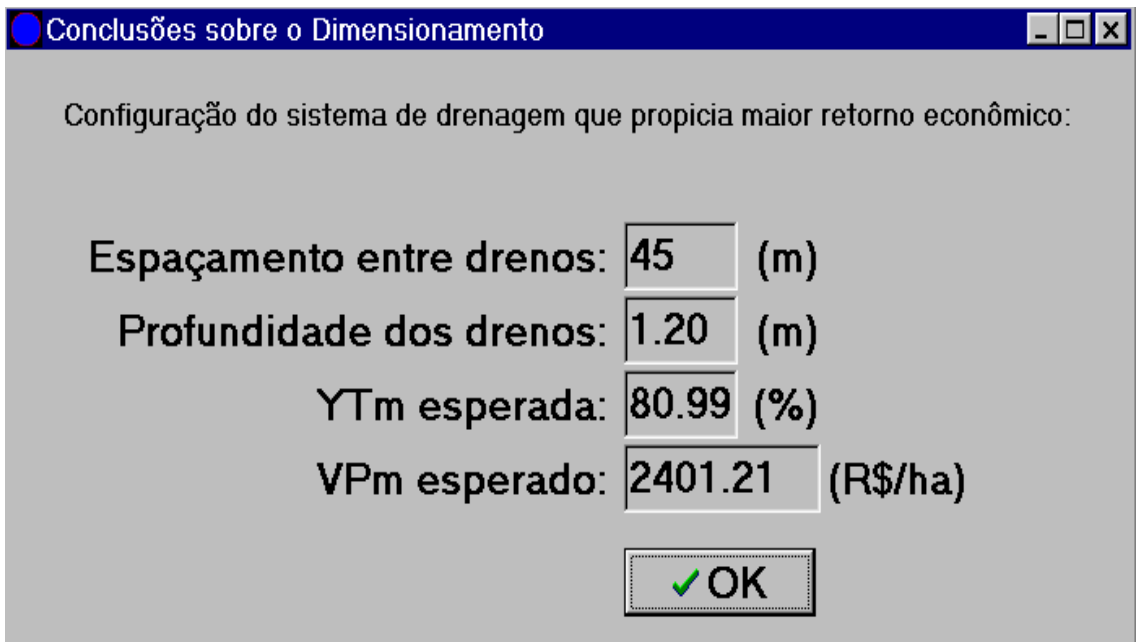


Figura 18 - Formulário “Conclusões sobre o Dimensionamento”.

4.2. Comparação do rebaixamento simulado do lençol freático pelo PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD

Os resultados obtidos pela aplicação dos modelos são apresentados na Figura 19. Um resultado esperado foi a pequena superestimativa das profundidades do lençol freático estimadas pelo PRODREN, em relação às estimadas pelo SIMDRENO, nas simulações feitas para espaçamentos de 30 e 50 m, o que, possivelmente, ocorreu pelo fato de o PRODREN contabilizar o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, mesmo quando não ocorre contribuição de chuva ou *seepage*, devendo-se ressaltar que os dois modelos utilizam a mesma equação para calcular o rebaixamento do lençol devido à drenagem.

Na Figura 19, observa-se que nas simulações realizadas para o espaçamento de 10 m as taxas de rebaixamento do lençol freático foram semelhantes para os primeiros cinco dias. A partir deste ponto, o DRAINMOD calculou profundidades do lençol freático maiores que as calculadas pelo PRODREN e SIMDRENO. DUARTE (1997) comparou os resultados de simulações realizadas pelo SIMDRENO e DRAINMOD e observou uma tendência de o DRAINMOD superestimar as profundidades do lençol freático. 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” (fração da zona radicular na qual a umidade atingiu o limite mínimo de absorção de água, isto é, o ponto de murcha permanente) com a espessura da “zona úmida” (região estendendo da base da “zona seca” ao lençol freático). Assim, à medida que a água vai sendo extraída da zona radicular, mesmo que o lençol não esteja em queda, o DRAINMOD considera como se ele estivesse, em virtude do aumento da profundidade da “zona seca”. ROGERS (1985) também advertiu que este fato acarreta uma superestimativa da profundidade do lençol freático pelo DRAINMOD, principalmente nos períodos em que este se encontra abaixo do nível dos drenos.

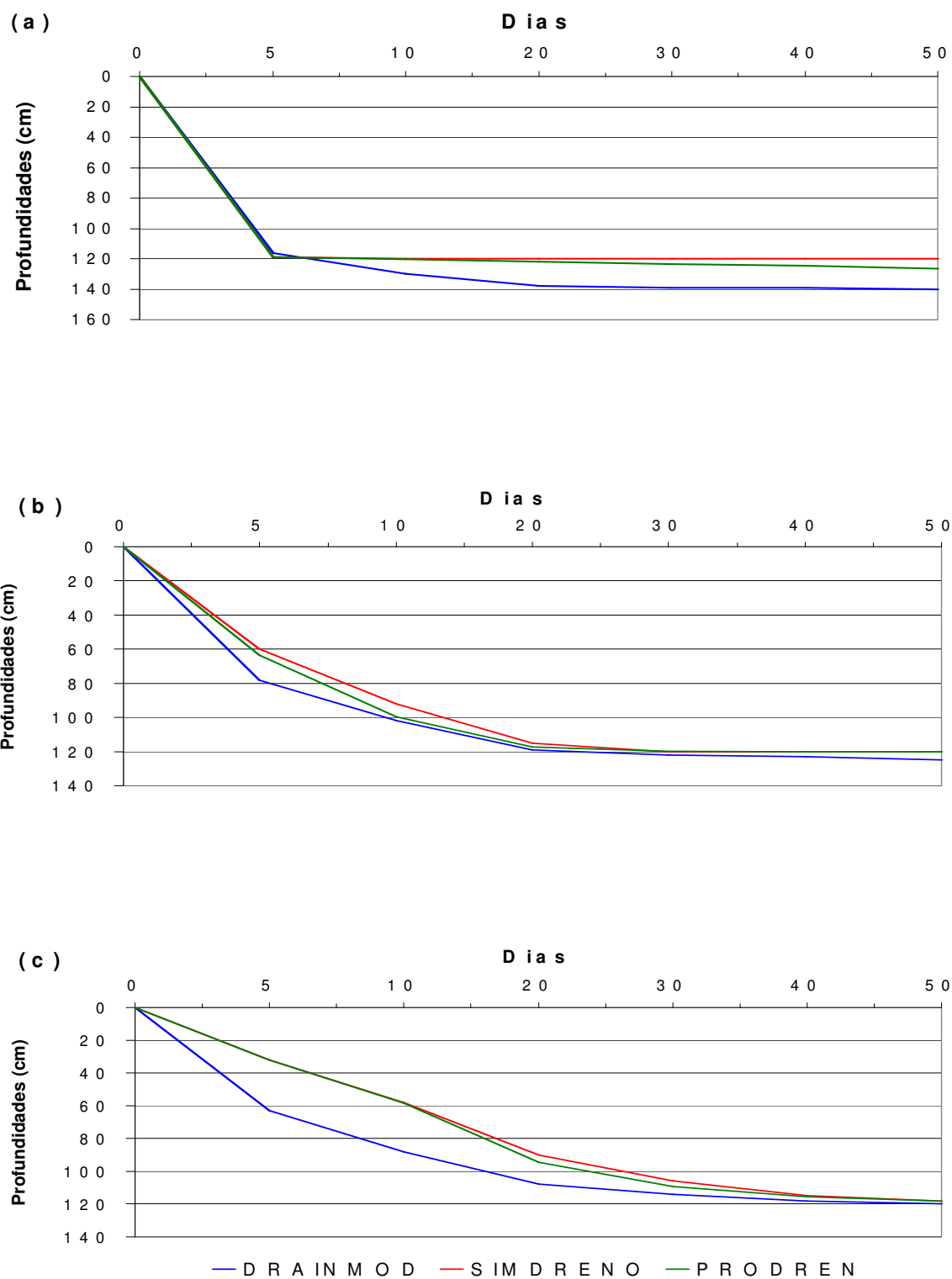


Figura 19 - Resultados de simulações de rebaixamento do lençol freático pelo DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN, para profundidade de

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.

Observando a Figura 19(a), verifica-se que a profundidade-limite do lençol freático a ser estimada pelo SIMDRENO é igual à profundidade dos drenos, o que já era esperado, pois o modelo não considera o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, quando não ocorre contribuição de precipitação ou *seepage*.

A tendência de o DRAINMOD gerar profundidades do lençol freático maiores que as geradas pelos outros dois modelos também ocorreu nas simulações realizadas para espaçamentos entre os drenos iguais a 30 e 50 m. Na Figura 19(b), relativa ao espaçamento de 30 m, observa-se que a partir de 20 dias os resultados obtidos pelos três modelos foram semelhantes, enquanto observa-se uma aproximação dos resultados a partir de 30 dias de rebaixamento do lençol na Figura 19 (c). É provável que tal fato ocorra também devido à forma como o DRAINMOD contabiliza a posição do lençol freático.

Por falta de mais dados em relação aos resultados das simulações de rebaixamento do lençol freático, efetuadas pelos modelos SIMDRENO e DRAINMOD, os gráficos da Figura 19 foram traçados com poucos pontos. Conseqüentemente, as linhas que representam a posição do lençol freático adquiriram um aspecto anguloso. A Figura 20 mostra o rebaixamento do lençol freático simulado pelo PRODREN, utilizando valores diários da profundidade do lençol, considerando o espaçamento entre os drenos de 30 m. Pode-se observar, nessa figura, que os valores de profundidade estimados pelo PRODREN ajustaram-se a um polinômio de quinto grau.

Considerando a aproximação dos resultados das simulações efetuadas pelo DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN, conforme a Figura 19, espera-se que o PRODREN tenha um bom desempenho em testes de campo, pois tanto o DRAINMOD quanto o SIMDRENO, em testes de campo conduzidos em outros trabalhos, mostraram bom desempenho quanto à simulação do rebaixamento do lençol freático. O Quadro 1 apresenta valores de erro-padrão entre hidrógrafas de

lençol freático medidas e simuladas, obtidos por alguns autores quando utilizavam os modelos DRAINMOD e SIMDRENO.

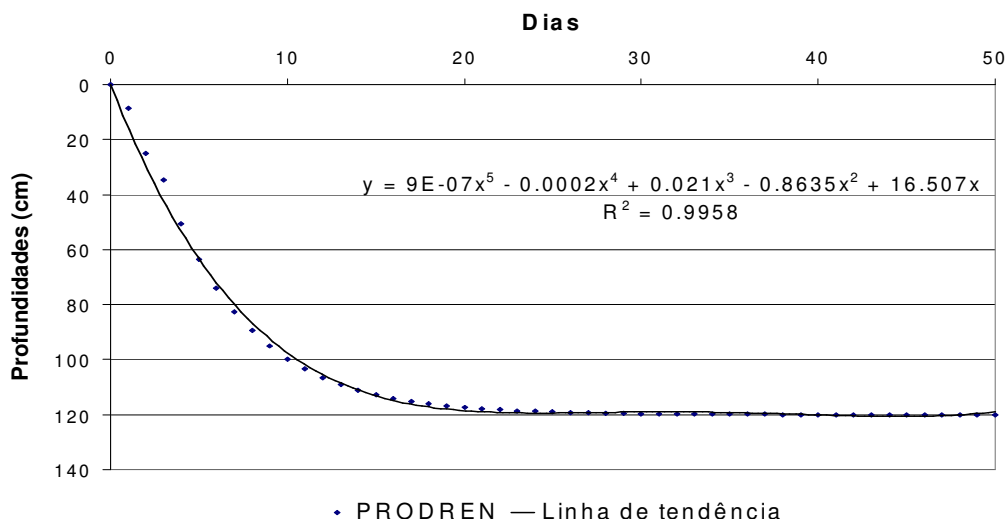


Figura 20 - Rebaixamento do lençol freático simulado pelo PRODREN considerando o espaçamento de 30 m e a coordenada vertical positiva para baixo.

4.3. Comparação entre produtividades relativas médias esperadas e análises econômicas obtidas por simulações feitas pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD

A metodologia utilizada no PRODREN considera que a evapotranspiração real decresce com a diminuição do teor de água do solo de forma exponencial, conforme a equação 22. Nos modelos DRAINMOD e SIMDRENO, a evapotranspiração real é considerada igual à evapotranspiração potencial enquanto o solo estiver com um teor de água superior àquele referente ao ponto de murcha permanente (SKAGGS, 1981; DUARTE, 1997). Verificou-se que os valores de evapotranspiração real diários e totais durante o ciclo da cultura, calculados pelo PRODREN, foram sensivelmente menores que os obtidos pelos dois outros modelos, pois relativamente poucas vezes foram estimados, pelos três modelos, valores de teor de água no solo próximos ao relativo ao ponto de murcha permanente, durante o período da simulação. O fator diário de estresse (SDdy) utilizado para estimar a produtividade relativa devido à deficiência de água no solo

(*YRD*), calculado pela equação 32, decresce de forma linear com o aumento da evapotranspiração real. Quando o valor da evapotranspiração real é igual à potencial, esse índice é igual a zero e *YRD* aproxima-se de 100%. Como resultado, os valores de *YRD* calculados pelos modelos DRAINMOD e SIMDRENO, em todas as simulações realizadas para a base de dados de entrada, descrita no subitem 3.3., foram sensivelmente maiores que os obtidos pela aplicação do PRODREN.

Tal fato evidenciou a necessidade de utilizar outra metodologia para estimativa de *YRD*, no PRODREN, devido à mudança na forma de cálculo da evapotranspiração real em relação aos dois outros modelos. Uma das alternativas a ser testada, em trabalhos futuros, é a proposta por DOORENBOS e KASSAM (1979).

Procurando uma maior consistência nas comparações de resultados obtidos nas simulações realizadas com os três modelos, rodou-se o PRODREN para as condições:

a) considerando o estresse devido à deficiência de água no solo. As estimativas realizadas segundo estas condições foram designadas como resultantes do PRODREN_{ce}; e

b) desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo, ou seja, igualando a produtividade relativa total esperada (*YT*) à produtividade relativa devido ao excesso de água no solo (*YRW*). Neste caso, as estimativas realizadas foram designadas como resultantes do PRODREN_{de}.

Deve ser frisado que as designações PRODREN_{ce} e PRODREN_{de} não se referem a dois modelos, e sim ao mesmo modelo operando em situações em que o estresse devido à deficiência de água no solo é considerado ou não.

Portanto, o PRODREN_{de} realizou análises econômicas com base em um nível de estresse mais próximo ao utilizado nas análises econômicas efetuadas pelos modelos DRAINMOD e SIMDRENO, quando preponderou o estresse devido ao excesso de água no solo.

4.3.1. Simulações não considerando o escoamento superficial

Nestas simulações, foi considerada a infiltração total da lâmina de precipitação. Os resultados obtidos são mostrados nas Figuras de 21 a 26, que apresentam as variações da produtividade relativa total média e do valor presente médio em função do espaçamento entre os drenos, para os três tipos de solo descritos no subitem 3.3. No Apêndice, encontram-se quadros com os valores relativos a essas figuras.

Observando as Figuras de 21 a 26, verifica-se que as relações entre os valores de Y_{Tm} e as relações entre os valores de VP_m , estimados pelos modelos, para cada espaçamento entre os drenos, são semelhantes, o que ocorre pelo fato de a VP_m ser diretamente proporcional a Y_{Tm} .

Na Figura 22 verifica-se que, para o solo 1, houve semelhança dos resultados de cálculos do valor presente efetuados pelo SIMDRENO, DRAINMOD e PRODRENde, para espaçamentos entre os drenos de até 55 m. Para espaçamentos maiores, os resultados obtidos pelo DRAINMOD e pelo PRODRENde mantiveram-se próximos, enquanto aqueles calculados pelo SIMDRENO decresceram sensivelmente.

Conforme os pontos de máximo das curvas de VP, verifica-se que o espaçamento de projeto, indicado pelo PRODRENce e DRAINMOD, foi de 45 m. Da mesma forma, o espaçamento de projeto indicado pelo PRODRENde e SIMDRENO foi de 40 m. Os valores presentes calculados pelo PRODRENce superaram os calculados pelo SIMDRENO a partir do espaçamento de 65 m. Tal fato pode ser explicado por não ser considerado, no SIMDRENO, o fluxo ascendente oriundo do lençol freático quando não ocorre precipitação ou *seepage* positivo (chegando ao lençol freático), o que acarreta em subestimativa da velocidade de queda do lençol freático. Este efeito é mais acentuado quanto mais raso estiver o lençol freático. Logo, para maiores espaçamentos, quando o lençol freático tende a permanecer mais elevado, é de se esperar aumento dos valores

calculados do índice diário de estresse devido ao excesso de água no solo e, conseqüentemente, diminuição de *YRW* e *YT* em relação aos valores obtidos pelo

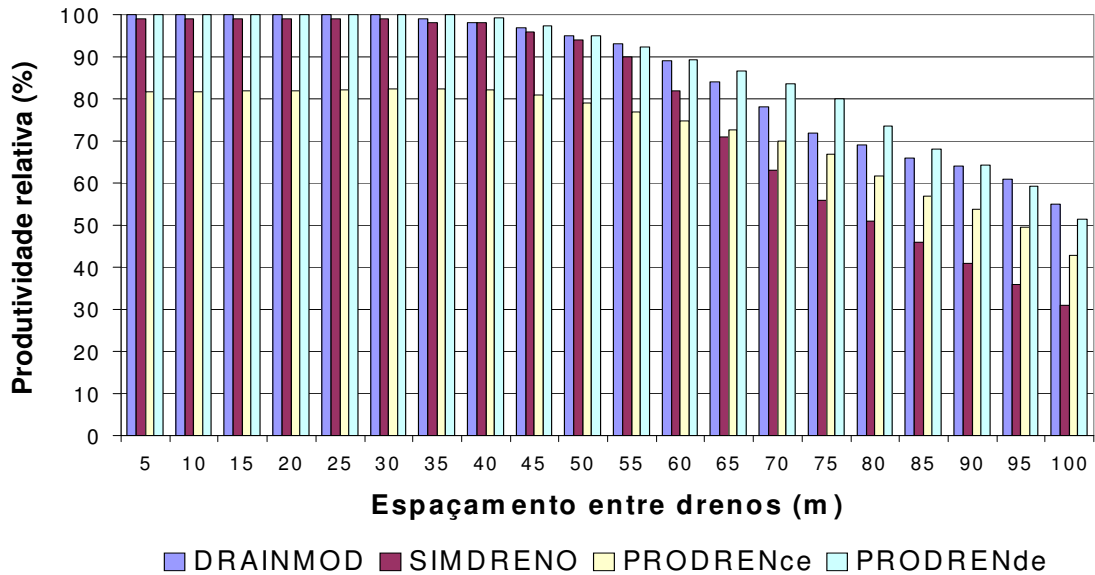


Figura 21 - Variação da produtividade relativa total média (*YTm*) com o espaçamento entre os drenos para o solo 1.

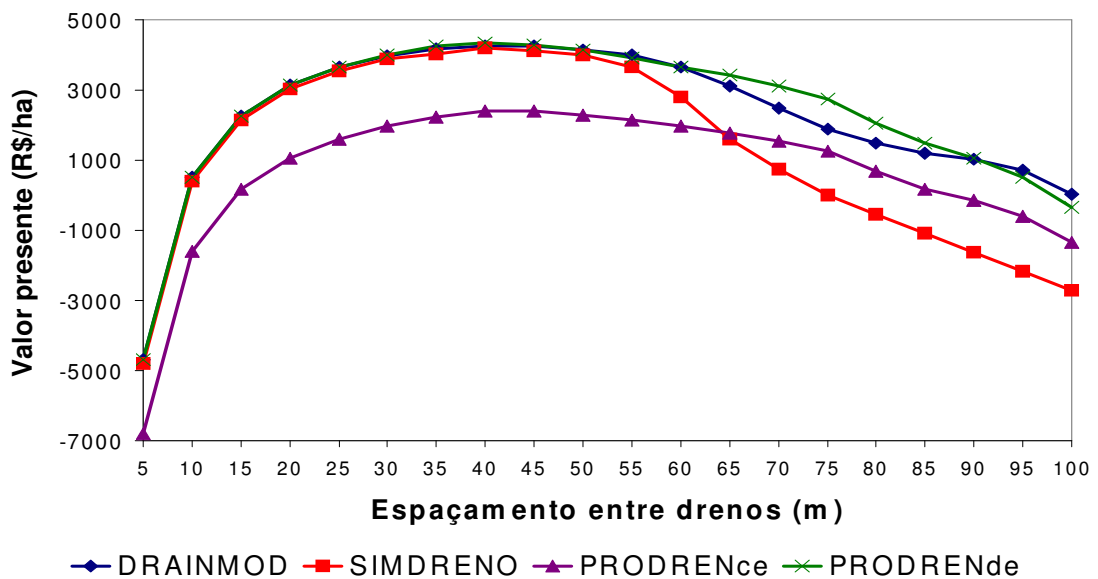


Figura 22 - Variação do valor presente médio (VPm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 1.

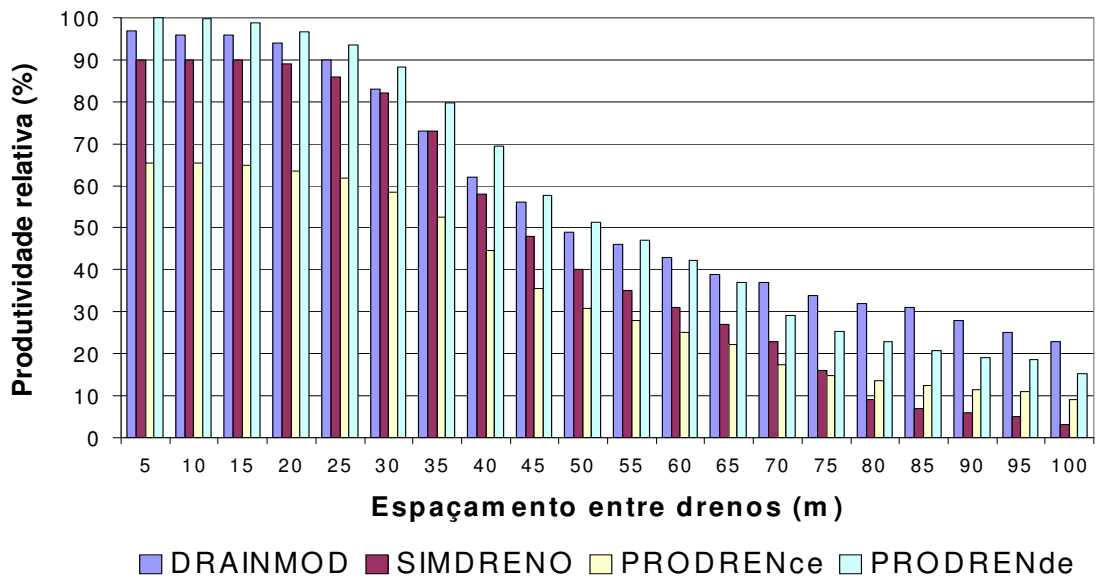


Figura 23 - Variação da produtividade relativa total média (YTm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 2.

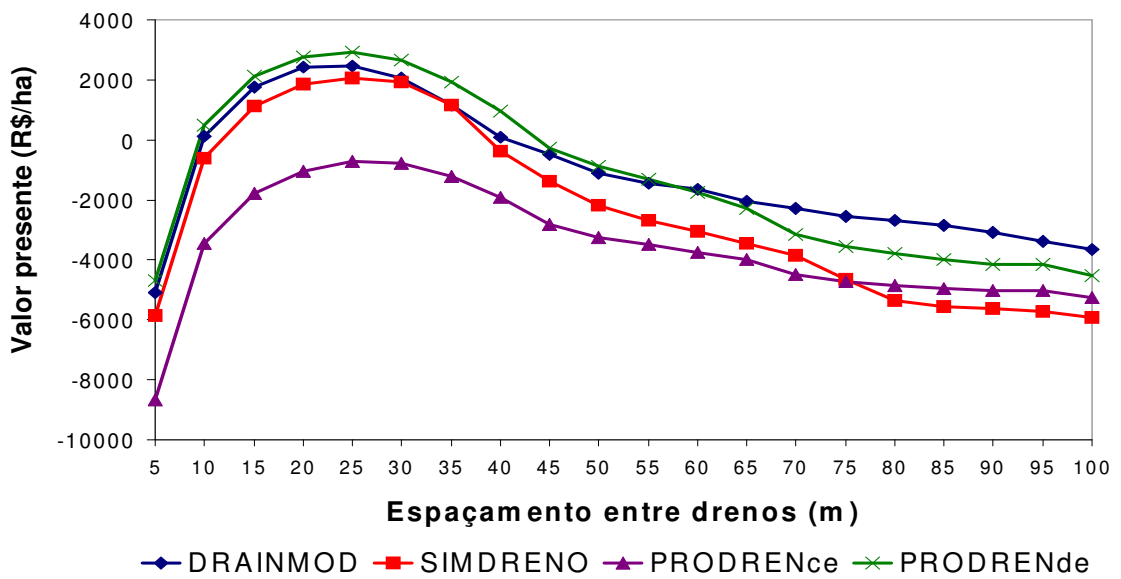


Figura 24 - Variação do valor presente médio (VPm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 2.

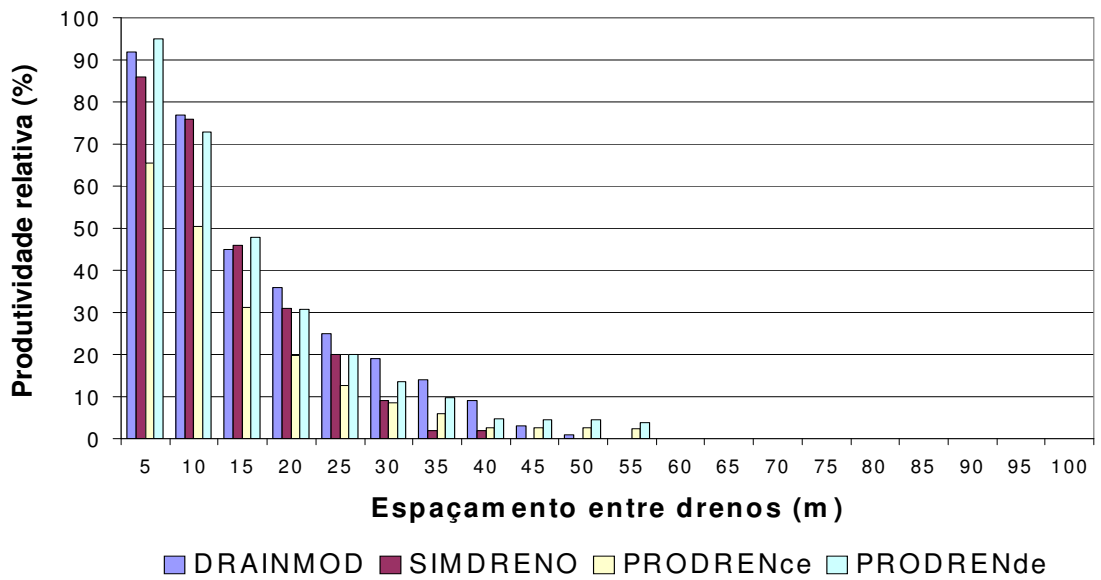


Figura 25 - Variação da produtividade relativa total média (YTm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 3.

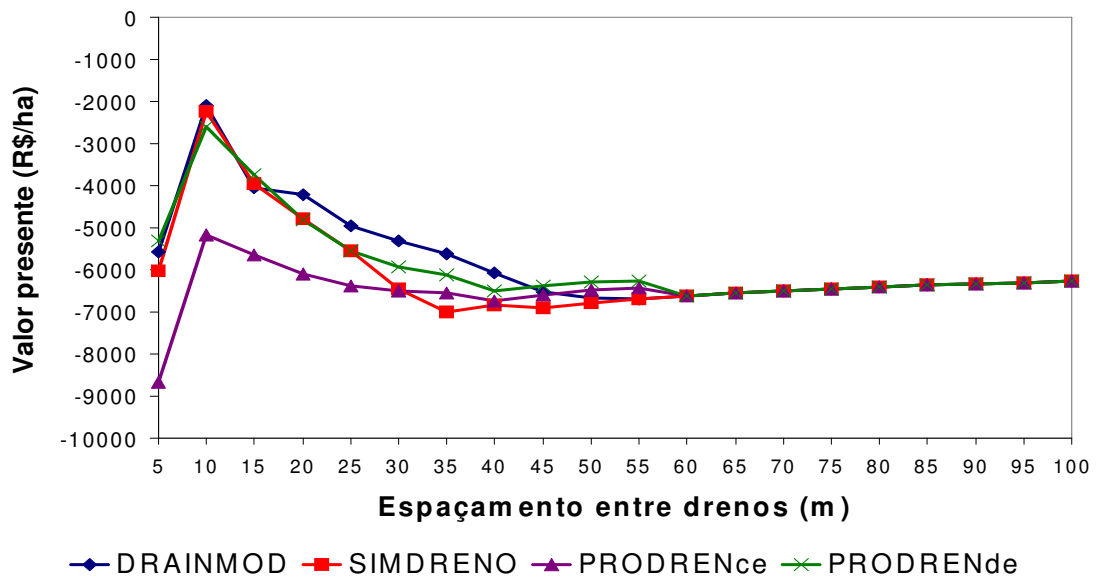


Figura 26 - Variação do valor presente médio (VPm) com espaçamento entre os drenos para o solo 3.

PRODRENce. Deve-se frisar, também, que os valores de *YRD* aumentam com o incremento do espaçamento entre os drenos, passando a contribuir menos para a diminuição de *YT* em relação à *YRW*.

Para o solo 2, os modelos indicaram o mesmo espaçamento de projeto, igual a 25 m. Pela Figura 24, verifica-se uma queda acentuada no valor presente calculado pelo SIMDRENO a partir do espaçamento de 40 m, em relação aos valores obtidos pelo DRAINMOD. Observou-se uma ligeira superestimativa nos valores calculados pelo PRODRENde em relação ao DRAINMOD, para espaçamentos inferiores a 45 m. Tal fato, possivelmente, ocorre por causa do estresse devido à deficiência de água no solo, que contribuiu para a queda nos valores de produtividade relativa média, calculados pelo DRAINMOD. Possivelmente, ajustando a metodologia de cálculo de *YRD* no PRODREN à forma como este modelo estima a evapotranspiração real, os valores presentes calculados tenderiam a se aproximar dos obtidos pelo SIMDRENO, neste caso. Os valores presentes calculados pelo PRODRENce superaram os calculados pelo SIMDRENO a partir do espaçamento de 80 m, pelas razões já mencionadas. O PRODRENce calculou valores presentes médios negativos para todos os espaçamentos analisados.

Todos os modelos indicaram o espaçamento de 10 m como o de melhor desempenho econômico nas simulações realizadas para o solo 3, conforme pode ser observado na Figura 26. Porém, para este solo, os resultados de todas as simulações indicaram valores presentes médios negativos, o que determina a inviabilidade de implantação de um projeto de drenagem, considerando a base de dados de entrada utilizada.

4.3.2. Simulações considerando o escoamento superficial

Os resultados das simulações que consideram o escoamento superficial, para os solos 1, 2 e 3, são mostrados nas Figuras de 27 a 32, que apresentam as variações da produtividade relativa total média e do valor presente médio em

função do espaçamento entre os drenos, para os três tipos de solo. No Apêndice, encontram-se quadros com os valores relativos a essas figuras.

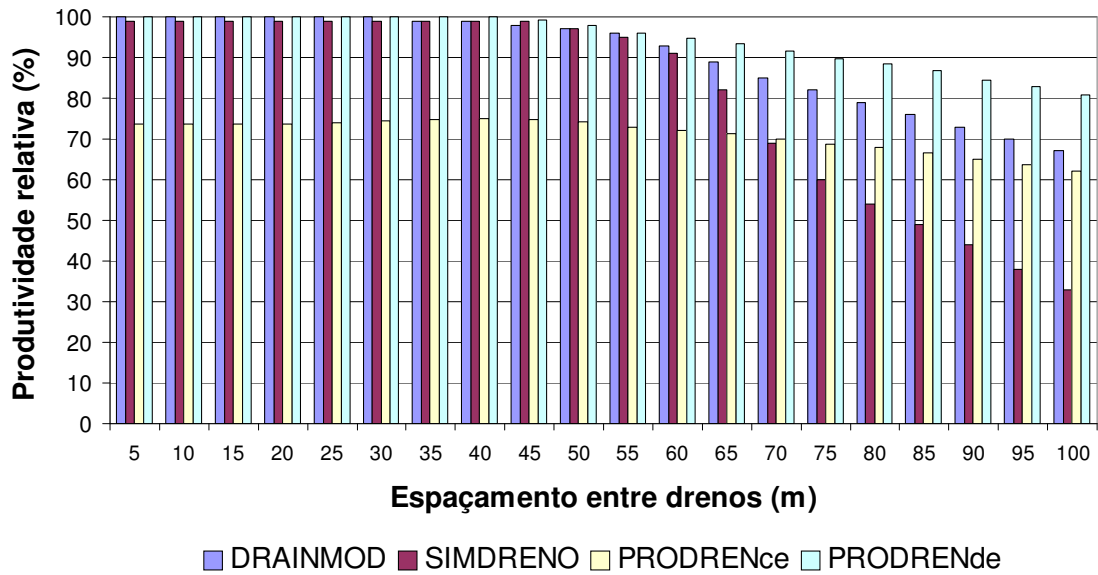


Figura 27 - Variação da produtividade relativa total média (YTm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 1.

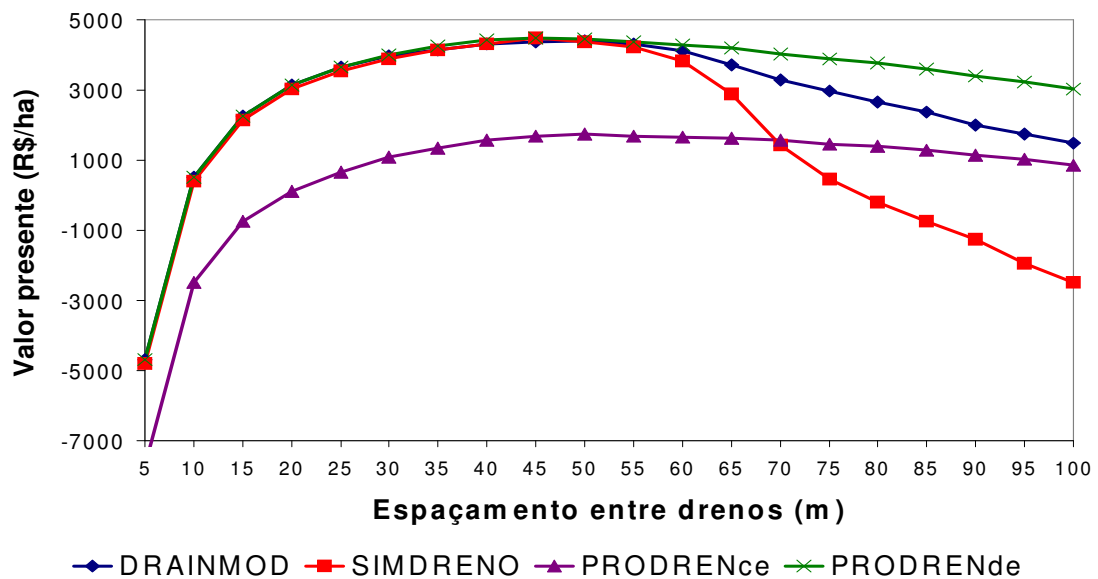


Figura 28 - Variação do valor presente médio (VPm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 1.

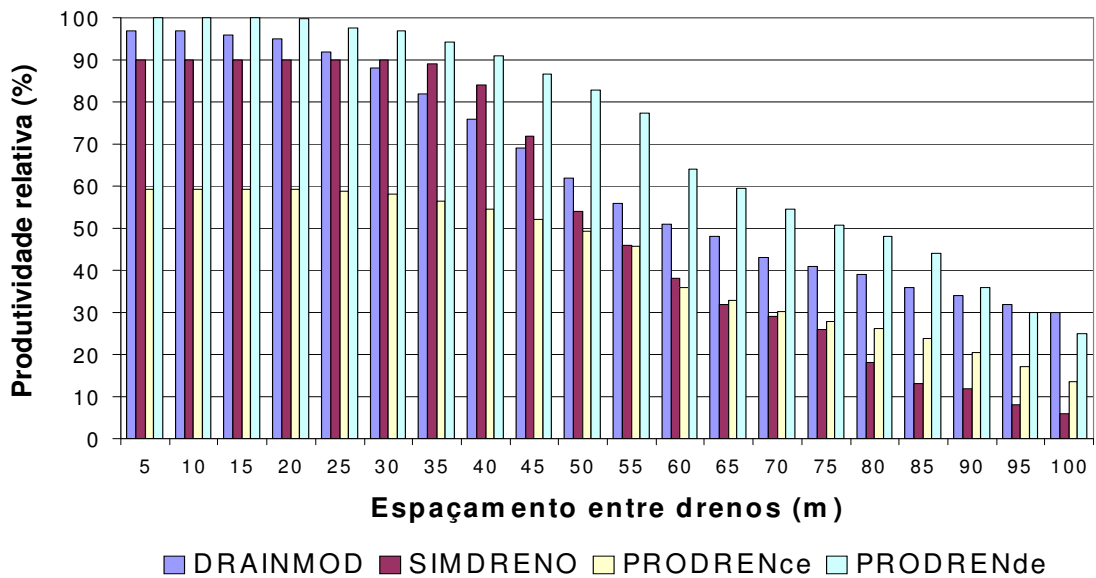


Figura 29 - Variação da produtividade relativa total média (YTm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 2.

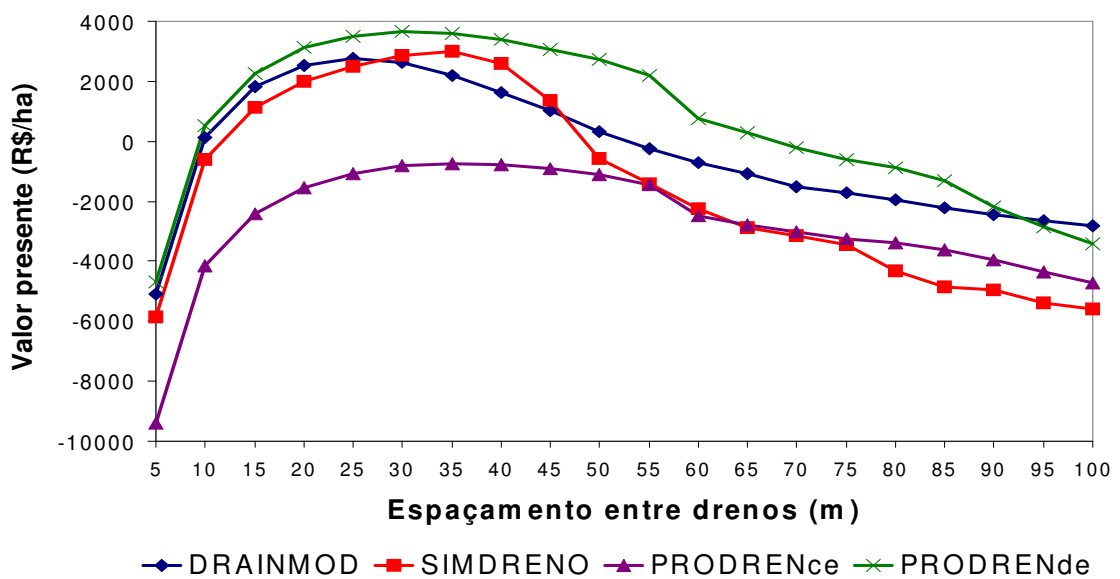


Figura 30 - Variação do valor presente médio (VPm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 2.

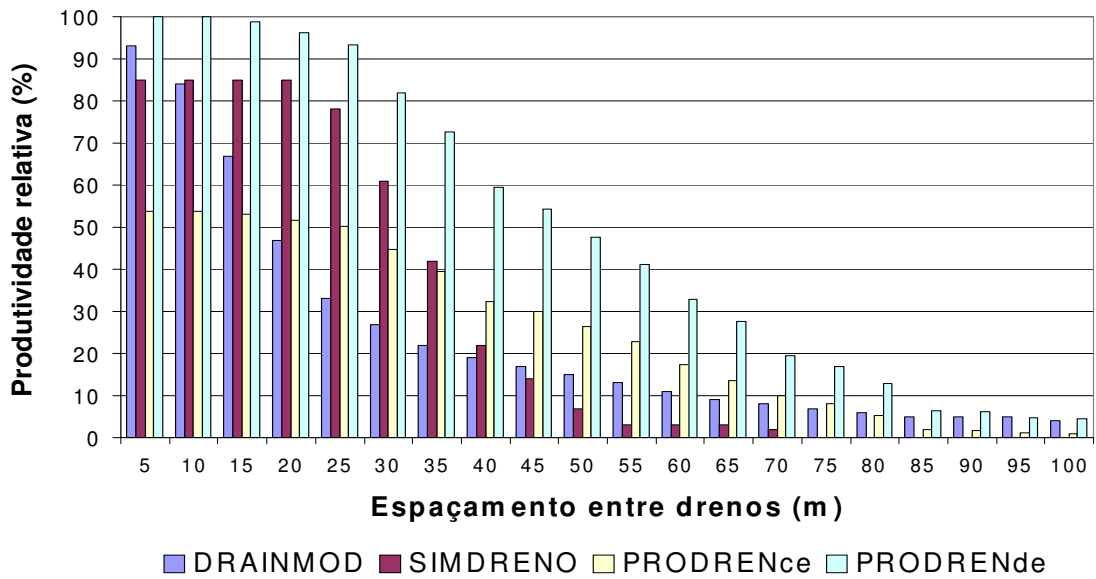


Figura 31 - Variação da produtividade relativa total média (YTm) com o espaçamento entre os drenos para o solo 3.

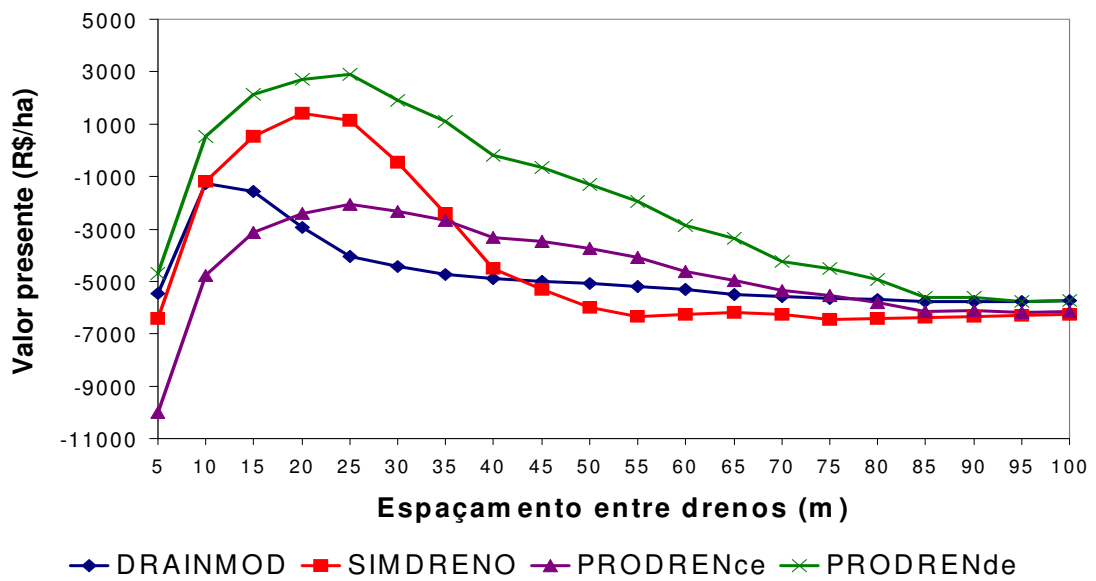


Figura 32 - Variação do valor presente médio (VPm) com espaçamento entre os drenos para o solo 3.

Conforme a Figura 28, verifica-se que os resultados dos cálculos do valor presente efetuados pelo SIMDRENO, DRAINMOD e PRODRENde, para espaçamentos entre os drenos de até 60 m, foram semelhantes. Para espaçamentos maiores, os resultados obtidos pelo PRODRENde foram superiores aos calculados pelos demais modelos. O espaçamento de projeto indicado pelo SIMDRENO e PRODRENde foi 45 m, e o indicado pelo DRAINMOD e PRODRENce foi 50 m, conforme pode ser verificado pelos pontos máximos da curva de *VP*. Os valores presentes calculados pelo PRODRENce superaram os calculados pelo SIMDRENO a partir do espaçamento de 70 m. Conforme o subitem 4.3.1., tal fato pode ser explicado por não se considerar, no SIMDRENO, o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, quando não ocorre precipitação ou *seepage* positivo (chegando ao lençol freático). Também, deve-se frisar que os valores de *YRD* aumentam com o incremento do espaçamento entre os drenos, passando a contribuir menos para a diminuição de *YT* em relação à *YRW*.

Analisando a Figura 30 verifica-se que, para o solo 2, os espaçamentos de projeto indicados pelos modelos foram 35, 25, 35 e 30 m, aplicando-se o SIMDRENO, DRAINMOD, PRODRENce e PRODRENde, respectivamente. Observa-se uma queda acentuada no valor presente calculado pelo SIMDRENO, a partir do espaçamento de 40 m, em relação aos valores obtidos pelo DRAINMOD. Observou-se uma superestimativa nos valores calculados pelo PRODRENde em relação ao DRAINMOD, para espaçamentos inferiores a 90 m, o que pode ser explicado pelo estresse devido à deficiência de água no solo, que contribuiu para a queda nos valores de produtividade relativa média calculados pelo DRAINMOD. Os valores presentes calculados pelo PRODRENce superaram os calculados pelo SIMDRENO a partir do espaçamento de 65 m, pelas razões mencionadas anteriormente. O PRODRENce calculou valores presentes médios negativos para todos os espaçamentos analisados.

Para o solo 3, os espaçamentos de projeto, indicados pelos modelos, que proporcionaram melhor desempenho econômico foram 20 m, pelo SIMDRENO,

10 m, pelo DRAINMOD, e 25 m pelo PRODRENce e PRODRENde, o que pode ser observado na Figura 32 e no Quadro 6A.

Conforme pode ser verificado na Figura 32, não houve boa concordância entre os valores presentes calculados pelos modelos. Para os espaçamentos de 5 e 10 m, os valores presentes calculados pelos programas DRAINMOD e SIMDRENO foram semelhantes. O SIMDRENO superestimou os valores presentes em relação aos obtidos pelo DRAINMOD para espaçamentos entre 10 e 40 m, possivelmente pelo fato de este modelo não contabilizar o fluxo ascendente oriundo do lençol freático, quando não ocorre precipitação ou “seepage” positivo (chegando ao lençol freático), como já discutido.

Para espaçamentos maiores que 40 m, os resultados do SIMDRENO foram inferiores aos calculados pelo DRAINMOD. É possível que isto ocorra pelo fato de o SIMDRENO, assim como o PRODREN, não considerar o efeito do espaçamento entre os drenos sobre o escoamento superficial. Os valores presentes calculados pelo PRODRENde foram os maiores para todos os espaçamentos analisados, ocorrendo semelhança de valores com o DRAINMOD para espaçamentos a partir de 85 m. Comparando, nestas condições, os modelos SIMDRENO e PRODRENce, pode-se verificar que para espaçamentos maiores que 35 m, quando o efeito da deficiência de umidade no solo sobre *YT* passou a ser menor, os valores presentes obtidos pelo último superaram os obtidos pelo primeiro.

Observando a Figura 32 e comparando o DRAINMOD ao PRODRENce, verifica-se que o segundo calculou maiores valores presentes para espaçamentos a partir de 20 m, o que possivelmente se deve ao fato, já mencionado, de o PRODREN não considerar o efeito da variação do espaçamento entre os drenos sobre o escoamento superficial. Deve também ser considerado que os modelos SIMDRENO e PRODREN trabalharam com coeficientes CN médios, o que tende a piorar o desempenho das simulações.

Comparando as Figuras 26 e 32, observa-se que as diferenças dos procedimentos de simulação do escoamento superficial, utilizados pelos modelos,

foram a principal origem da divergência dos resultados obtidos na comparação relativa à Figura 32.

4.4. Comparações entre dimensionamentos realizados com base no balanço hídrico e nos critérios econômicos e aqueles com base nos critérios de drenagem tradicionais

O Quadro 5 apresenta o resumo dos resultados obtidos com a aplicação do DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN e com a aplicação dos critérios de drenagem de PIZARRO (1978) e CRUCIANI (1987). A base de dados de entrada utilizada foi a descrita no subitem 3.3.

Quadro 5 - Espaçamentos entre os drenos obtidos pela aplicação dos modelos DRAINMOD (DRA), SIMDRENO (SIM), PRODRENce (PROce) e PRODRENde (PROde) e pela utilização dos métodos propostos por Pizarro (PIZ) e Cruciani (CRU), não considerando o escoamento superficial e considerando o escoamento superficial, para três tipos de solo

| | Não Considerando o Escoamento Superficial | | | | | | Considerando o Escoamento Superficial | | | | | |
|--------|---|-----|-------|-------|-----|-----|---------------------------------------|-----|-------|-------|-----|-----|
| | DRA | SIM | PROce | PROde | PIZ | CRU | DRA | SIM | PROce | PROde | PIZ | CRU |
| Solo 1 | 45 | 40 | 45 | 40 | 16 | 22 | 50 | 45 | 50 | 45 | - | 28 |
| Solo 2 | 25 | 25 | *25 | 25 | 13 | 16 | 25 | 35 | *35 | 30 | - | 22 |
| Solo 3 | *10 | *10 | *10 | *10 | 5 | 4 | *10 | 20 | *25 | 25 | - | 7 |

* Os valores presentes calculados foram negativos.

Verifica-se que os espaçamentos calculados conforme os critérios de PIZARRO (1978) 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 de os critérios tradicionais de dimensionamento não considerarem o fluxo ascendente

oriundo do lençol freático, o aspecto econômico e, no caso da metodologia de PIZARRO (1978), o escoamento superficial.

Vale destacar, também, que a utilização dos critérios preconizados por PIZARRO (1978) 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 DRAINMOD, SIMDRENO e PRODREN. Além disto, observa-se a tendência de os métodos que utilizam critérios tradicionais de dimensionamento proporcionarem a máxima produtividade relativa, devido ao excesso de água no solo, não visando o melhor desempenho do ponto de vista econômico.

É bom enfatizar, ainda, que a implantação de sistemas de drenagem com espaçamentos entre os drenos menores que os adequados, além de acarretar em aumento dos custos de implantação e de manutenção, pode proporcionar profundidades excessivas do lençol freático em períodos sem incidência de chuvas críticas. Conseqüentemente, pode ocorrer estresse devido à deficiência de água na zona radicular, resultando em queda de produtividade. Neste caso, as medidas corretivas são a aplicação de lâminas de irrigação ou o controle da drenagem, o que 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 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 Kimbal. A utilização deste critério tende a gerar espaçamentos pouco menores, pois, além de contemplar o aspecto econômico, visa diminuir os riscos, conforme comentários de DUARTE (1997).

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Considerando a necessidade de ferramentas que contribuam para a melhoria do dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola nas condições de solo e clima dos trópicos, mais especificamente para as regiões brasileiras de clima úmido e subúmido, foi desenvolvido um modelo computacional denominado PRODREN. A aplicação deste modelo visa simular a movimentação do lençol freático e o balanço hídrico na zona radicular, como também analisar sistemas de drenagem, segundo o aspecto econômico. Como dados de entrada o modelo necessita de séries históricas de dados diários pluviométricos e de evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, parâmetros da cultura, parâmetros econômicos e dados relativos à geometria do sistema de drenagem. No desenvolvimento do PRODREN, foi considerada a necessidade de trabalhar com uma base de dados de entrada disponíveis no País e de melhorar a interface com o usuário, por serem estas as principais lacunas não-supridas pelos modelos existentes.

O cálculo do escoamento superficial é feito pelo método do Número da Curva. O rebaixamento do lençol freático devido à drenagem é calculado pela equação de recarga intermitente de Kraijenhoff Van de Leur – Maasland. Além da drenagem, é considerado o efeito do fluxo ascendente sobre o rebaixamento do lençol. O fluxo ascendente oriundo do lençol é obtido como resultado do balanço

hídrico, considerando-se um valor máximo calculado pela equação de Darcy-Buckingham, resolvida por diferenças finitas. Por causa da interdependência existente entre as variáveis envolvidas nos cálculos da drenagem e do balanço hídrico, utilizou-se um processo iterativo.

A análise econômica é feita com base nos parâmetros econômicos, relativos à implantação e manutenção do sistema de drenagem, e nas produtividades relativas, que dependem da sensibilidade da cultura ao excesso e à deficiência de água no solo.

Por meio de análises econômicas e simulações do rebaixamento do lençol freático, comparou-se o desempenho do PRODREN ao dos modelos SIMDRENO e DRAINMOD. Foram comparados, também, os dimensionamentos realizados pelo PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD com os obtidos pela aplicação dos critérios tradicionais de dimensionamento preconizados por Pizarro e Cruciani.

A base de dados de entrada para a aplicação do PRODREN foi extraída do estudo conduzido por DUARTE (1997), assim como os resultados das simulações efetuadas pelo SIMDRENO e DRAINMOD.

Pelos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- conseguiu-se, com o PRODREN, melhorar a comunicação com o usuário, em relação ao SIMDRENO e DRAINMOD;

- verificou-se que os resultados das simulações de rebaixamento do lençol freático efetuadas pelos três modelos foram similares, ocorrendo, no entanto, superestimativa dos valores de profundidade do lençol gerados pelo DRAINMOD, em comparação aos gerados pelo PRODREN e pelo SIMDRENO, quando foi considerado o espaçamento entre os drenos de 50 m, para profundidade de dreno de 1,2 m;

- houve concordância quanto às configurações ótimas de sistemas de drenagem, isto é, espaçamento e profundidade de drenos, obtidas por meio das análises econômicas realizadas pelos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD;

- observou-se que os valores dos índices econômicos calculados pelos três modelos foram semelhantes, considerando níveis equivalentes de estresse conseqüentes da deficiência de água no solo;

- verificou-se que as limitações em relação à necessidade de dados horários de chuva, pelo DRAINMOD, foram superadas pelo PRODREN e SIMDRENO, devido ao uso da equação de recarga intermitente de Kraijenhoff Van de Leur – Maasland, o que permitiu a utilização de dados pluviométricos diários;

- verificou-se que 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; e

- observou-se que a aplicação dos modelos PRODREN, SIMDRENO e DRAINMOD permite analisar a viabilidade, segundo o aspecto econômico, da implantação de sistemas de drenagem, em contraposição às metodologias tradicionais de dimensionamento de sistemas de drenagem, que não permitem tal análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARMSTRONG, A.C., RYCROFT, D.W., WELCH, D.J. Modeling watertable response to climatic inputs - Its use in evaluating drainage designs in Britain. **Journal of the Agricultural Engineering Research**, v.25, n.3, p.311-323, 1980.
- ASCOUGH II, J.C., BAFFAUT, C., NEARING, M.A., LIU, B.Y. The WEPP watershed model: I. hydrology and erosion. **Transactions of the ASAE**, v.40, n.4, p.921-933, 1997.
- BEASLEY, D.B., HUGGINS, L.F., MONKE, E.J. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.938-944, 1980.
- BELTRAN, J.M. Land drainage. In: van LIER, H.N., PEREIRA, L.S., STEINER, F.R. (Eds.) **CIGR handbook of agricultural engineering: land and water engineering**. American Society Engineers; U.S.A., 1999, p.430-484.
- BENGTSON, R.L., GARZON, R.S., FOUSS, J.L. A fluctuating watertable model for the management of a controlled-drainage/subirrigation system. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.2, p.437-443, 1993.
- BERNARDO, S. Impacto ambiental da irrigação no Brasil. In: SILVA, D.D., PRUSKI, F.F. (Eds.) **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura**. Brasília-DF: MMA; SRH; ABEAS; Viçosa-MG: UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1997, p.79-88.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 5.ed. Viçosa, UFV, 596p., 1989.

- BOWER, H. Developing drainage design criteria. In: SCHILFGAARDE, J. van. (Ed.) **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.67-81.
- BUARQUE, C. **Avaliação econômica de projetos**. Rio de Janeiro: Campus. 1991. 266p.
- CARTER, C.E., IRVINE, J.E., McDANIEL, V. et al. Yield response of sugarcane to stalk density and subsurface drainage treatments. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.1, p.172-178, 1985.
- CARVALLO, H.O., HOLZAPFEL, E.A., LOPEZ, M.A., MARIÑO, M.A. Irrigated cropping optimization. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.124, n.2, p.67-72, 1998.
- CHANG, A.C., SKAGGS, R.W., HERMSMEIER, L.F. et al. Evaluation of a water management model for irrigated agriculture. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.2, p.412-418, 1983.
- CHIENG, S., BROUGHTON, R.S., FOROUD, N. Drainage rates and water-table depths. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.104, n.4, p.413-433, 1978.
- CHUNG, S.O., WARD, A.D., SCHALK, C.W. Evaluation of the hydrologic component of the ADAPT water management model. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.2, p.571-579, 1992
- COSTA, R.N.T., **Espaçamento econômico de drenos laterais e a dinâmica do lençol freático sobre o rendimento da cultura do milho (*Zea mays*, L.)**. Piracicaba: ESALQ, 1994. 88p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1994.
- CRUCIANI, D.E. Caracterização agrônômica do coeficiente de drenagem para elaboração de projetos com cultura de milho (*Zea mays*, L.). **Irrigação e Tecnologia Moderna**, n.2, p.28-31, 1985.
- CRUCIANI, D.E. **A drenagem na agricultura**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1987. 337p.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (Paper 33).
- DOURADO NETO, D., LIER, Q.J.V., BOTREL, T.A. et. al. Programa para confecção da curva de retenção da água no solo utilizando o modelo de GENUCHTEN. **Engenharia Rural**, v.1, n.2, p.92-102, 1990.

- DURNFORD, D.S., PODMORE, T.H., RICHARDSON, E.V. Optimal drain design for arid, irrigated areas. **Transactions of the ASAE**, v.27, n.4, p.1100-1105, 1984.
- 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 em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- FAO. **Drainage design factors; 28 questions and answers**. Rome: FAO, 1986. 52p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 38)
- FAUSEY, N.R., NOLTE, B.H., BEATHARD, P.S. Subsurface drainage maintenance in Ohio. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.997-1001, 1982.
- FERREIRA, P.A. **Curso de engenharia de irrigação. XI. Drenagem**. Brasília-DF: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. 1998. 86p.
- FOUSS, J.L., BENGTON, R.L., CARTER, C.E. Simulating subsurface drainage in the lower Mississippi Valley with DRAINMOD. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.6, p.1679-1688, 1987.
- GARCIA, L.A., MANGUERRA, H.B., GATES, T.K., Irrigation-drainage design and management model: development. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.121, n.1, p.71-82, 1995.
- GARDNER, W.R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p.228-232, 1957.
- GAYLE, G.A., SKAAGS, R.W., CARTER, C.E. Effects of excessive soil water conditions on sugarcane yields. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.4, p.993-997, 1987.
- GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v.44, n.3, p.892-898, 1980.
- GITTINGER, J.P. **Economic analysis of agricultural projects**. The Economic Development Institute International Bank for Reconstruction and Development. United States of America. 1972. 221p.

- GOWDA, P., WARD, A., WHITE, D., LYON, J., DESMOND, E. The sensitivity of ADAPT model predictions of streamflows to parameters used to define hydrologic response units. **Transactions of the ASAE**, 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**, v.25, n.3, p.922-927, 1982.
- HAVARD, P.L., PRASHER, S.O., BONNELL, R.B, MADANI, A. LINKFLOW, a water flow computer model for drainage and subirrigation: part1. model development. **Transactions of the ASAE**, v.38, n.2, p.481-488, 1995.
- HAVARD, P.L., PRASHER, S.O., BONNELL, R.B, MADANI, A. LINKFLOW, a water flow computer model for water table management: part2. model verification. **Transactions of the ASAE**, v.40, n.6, p.1539-1542, 1997.
- HILER, E.A. Quantitative evaluation of crop-drainage requirements. **Transactions of the ASAE**. v.12, n.4, p.499-505, 1969.
- KANWAR, R.S., JOHNSON, H.P., SCHULT, D. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.2, p.457-464, 1983.
- KURIEN, V.M., COOKE, R.A., HIRSCHI, M.C., MITCHELL, J.K. Estimating drain spacing of incomplete drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.40, n.2, p.377-382, 1997.
- LEAVESLEY, G.H., STANNARD, L.G. The precipitation-runoff modeling systems-PRMS. In: SINGH, V.P. (Ed.) **Computer models of watershed hydrology**. Baton Rouge: Louisiana State University. Department of Civil and Environmental Engineering, p.281-310, 1995.
- LEITCH, J.A. Economics of prairie wetland drainage. **Transactions of the ASAE**, v.26, n.5, p.1465-1470, 1983.
- LEONARD, R.A., KNISEL, W.G., STILL, D.A. GLEAMS: groundwater loading effects of agricultural management systems. **Transactions of the ASAE**, v.30, n.5, p.1413-1418, 1987.
- MCMAHON, P.C., MOSTAGHIMI, S., WRIGHT, F.S., Simulation of corn yield by a water management model for coastal plain soil in Virginia. **Transactions of the ASAE**, v.31, n.3, p.734-742, 1988.
- MINDERHOUND, P. A model for the design of drainage in flat agricultural. **Agricultural Water Management**. v.5, n.2, p.95-125, 1982.

- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, n.3, p.513-522, 1976.
- NORONHA, J.F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**, 2.ed., São Paulo: Atlas, 1987. 269p.
- PARSONS, J.E., SKAGGS, R.W., DOTY, C.W. Development and testing of a water management model (WATRCOM): development. **Transactions of the ASAE**, v.34, n.1, p.120-128, 1991.
- PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Española, 1978. 521p.
- PRUSKI, F.F., SILVA, D.D. Escoamento superficial. **Engenharia na Agricultura**, n.26, 1997.
- RENARD, K.G. et al. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. U.S. Dep. Agric. Handbook nº 703, 1997.
- REYES, M.R., BENGSTON, R.L., FOUSS, J.L. GLEAMS: hydrology submodel for shallow water table conditions. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.6, p.1771-1778, 1993.
- ROGERS, J.S. Water management model evaluation for shallow sandy soils. **Transactions of the ASAE**, v.28, n.3, p.785-790, 1985.
- SALTER, P.J., GOODE, J.E. **Crop responses to water at different stages of growth**. England: Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Bucks. 1967. 246p.
- SABAGGH, G.L., BENGSTON, R.L., FOUSS, F.L. Modification of EPIC to incorporate drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.34, n.2, p.467-472, 1991.
- SABBAGH, G.L., FOUSS, J.L., BENGSTON, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. **Transactions of the ASAE**, v.36, n.1, p.73-79, 1993.
- SANOJA, J., KANWAR, S., MELVIN, S.W. Comparison of simulated (DRAINMOD) and measured tile outflow and water table elevations from two field sites in Iowa. **Transactions of the ASAE**, v.33, n.3, p.827-833, 1990.

- SCHILFGAARDE, J. van. Nonsteady flow to drains In: SCHILFGAARDE, J. van. **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.245-270.
- SHIRMOHAMMADI, A., THOMAS, D.L., SMITH, M.C., Drainage-subirrigation design for Pelham loamy sand. **Transactions of the ASAE**, v.34, n.1, p.73-80, 1991.
- 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.
- SKAGGS, R.W. Effect of drain tube openings on water table drawdown. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.104, n3, p.13-21, 1978.
- SKAGGS, R.W., FAUSEY, N.R., NOLTE, B.H. Water management model evaluation for north central Ohio. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.3, p.922-928, 1981.
- SKAGGS, R.W. Field evaluation of a management simulation model. **Transactions of the ASAE**, v.25, n.3, p.666-674, 1982.
- SKAGGS, R.W. The effect of surface drainage on water table response to rainfall. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.2, p.406-411, 1974.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA. **Drainage of agricultural land**: A practical handbook for the planning, design, construction, and maintenance of agricultural drainage systems. New York: Water Information Center, Inc. Port Washington, 1973. 430p.
- SOIL CONSERVATION SERVICE, USDA. **National engineering handbook. IV. Hydrology**. 1972.
- TARJUELO, J.M., JUAN, J.A. Crop water management. In: van LIER, H.N., PEREIRA, L.S., STEINER, F.R. (Eds.) **CIGR handbook of agricultural engineering: land and water engineering**. American Society Engineers; U.S.A., 1999, p.380-429.
- 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 em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.

- WESSELING, J. Crop growth and wet soils. In: VAN SCHILFGAARDE, J. (Ed.) **Drainage for agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, p.7-37, 1974.
- WISER, E.H., WARD, R.C., LINK, D.A. Optimized design of a subsurface drainage system. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.1, p.175-182, 1974.
- WORKMAN, S.R., SKAGGS, R.W. Comparison of two drainage simulation models using field data. **Transactions of the ASAE**, v.32, n.6, p.1933-1938, 1989.
- WOILER, S., MATHIAS, W.F. **Projetos: planejamento, elaboração e análise**. São Paulo. Atlas, 1986. 294p.
- YOUNG, T.C., LIGON, J.T. Water table and soil moisture probabilities with tile drainage. **Transactions of the ASAE**, v.15, n.2, p.448-451, 1972.
- YOUNG, R.A., ONSTAD, C.A., BOSCH, D.D. AGPNS: an agricultural nonpoint source model. In: SINGH, V.P. (Ed.) **Computer models of watershed hydrology**. Baton Rouge: Louisiana State University. Department of Civil and Environmental Engineering, p.1001-1020, 1995.

APÊNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODREN para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 1, não considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODREN ⁽¹⁾ | | PRODREN ⁽²⁾ | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 99 | -4.809,77 | 100 | -4.694,81 | 81,6 | -6.809,95 | 100,0 | -4.694,81 |
| 10 | 99 | 411,31 | 100 | 526,27 | 81,6 | -1.588,71 | 100,0 | 526,27 |
| 15 | 99 | 2.151,66 | 100 | 2.266,63 | 81,9 | 180,96 | 100,0 | 2.266,63 |
| 20 | 99 | 3.021,84 | 100 | 3.132,21 | 82,0 | 1.068,54 | 100,0 | 3.136,81 |
| 25 | 99 | 3.543,95 | 100 | 3.646,27 | 82,2 | 1.609,57 | 100,0 | 3.658,91 |
| 30 | 99 | 3.892,02 | 100 | 3.969,05 | 82,3 | 1.972,64 | 100,0 | 4.006,98 |
| 35 | 98 | 4.025,69 | 99 | 4.163,64 | 82,4 | 2.235,67 | 100,0 | 4.249,37 |
| 40 | 98 | *4.212,15 | 98 | 4.252,39 | 82,2 | 2.399,04 | 99,2 | *4.347,18 |
| 45 | 96 | 4.127,26 | 97 | *4.269,81 | 81,0 | *2.401,21 | 97,4 | 4.289,63 |
| 50 | 94 | 4.013,36 | 95 | 4.151,32 | 79,1 | 2.296,09 | 95,0 | 4.129,19 |
| 55 | 90 | 3.648,45 | 93 | 4.012,88 | 77,0 | 2.154,15 | 92,3 | 3.914,01 |
| 60 | 82 | 2.807,87 | 89 | 3.666,63 | 74,7 | 1.965,66 | 89,3 | 3.652,22 |
| 65 | 71 | 1.610,24 | 84 | 3.103,58 | 72,5 | 1.785,14 | 86,7 | 3.416,61 |
| 70 | 63 | 747,93 | 78 | 2.473,49 | 70,0 | 1.553,36 | 83,6 | 3.117,93 |
| 75 | 56 | -7,07 | 72 | 1.886,33 | 67,0 | 1.258,38 | 80,0 | 2.749,47 |
| 80 | 51 | -538,37 | 69 | 1.490,69 | 61,6 | 678,52 | 73,6 | 2.064,01 |
| 85 | 46 | -1.074,78 | 66 | 1.210,64 | 56,9 | 177,12 | 68,2 | 1.474,38 |
| 90 | 41 | -1.615,46 | 64 | 1.017,14 | 53,9 | -135,81 | 64,3 | 1.057,60 |
| 95 | 36 | -2.159,73 | 61 | 726,93 | 49,5 | -608,65 | 59,2 | 509,33 |
| 100 | 31 | -2.707,06 | 55 | 16,36 | 42,8 | -1.353,25 | 51,5 | -350,31 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.

Quadro 2A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODRENO para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 2, não considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODRENO ⁽¹⁾ | | PRODRENO ⁽²⁾ | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 90 | -5.844,42 | 97 | -5.097,18 | 65.4 | -8.672,79 | 100,0 | -4.694,81 |
| 10 | 90 | -623,34 | 96 | 111,26 | 65.4 | -3.452,07 | 99,8 | 504,91 |
| 15 | 90 | 1.117,02 | 96 | 1.767,26 | 64.9 | -1.770,15 | 98,8 | 2.123,66 |
| 20 | 89 | 1.872,24 | 94 | 2.425,20 | 63.6 | -1.047,84 | 96,7 | 2.758,50 |
| 25 | 86 | *2.049,46 | 90 | *2.461,02 | 61.9 | *-720,39 | 93,6 | *2.921,00 |
| 30 | 82 | 1.937,69 | 83 | 2.071,04 | 58.4 | -772,95 | 88,3 | 2.665,23 |
| 35 | 73 | 1.151,67 | 73 | 1.175,81 | 52.5 | -1.205,00 | 79,8 | 1.932,09 |
| 40 | 58 | -386,28 | 62 | 79,31 | 44.7 | -1.916,97 | 69,6 | 943,77 |
| 45 | 48 | -1.390,86 | 56 | -463,12 | 35.5 | -2.830,81 | 57,7 | -270,96 |
| 50 | 40 | -2.194,52 | 49 | -1.117,34 | 30.8 | -3.253,43 | 51,4 | -888,45 |
| 55 | 35 | -2.674,40 | 46 | -1.430,52 | 27.9 | -3.486,85 | 47,0 | -1.296,34 |
| 60 | 31 | -3.055,13 | 43 | -1.658,36 | 25.1 | -3.737,84 | 42,2 | -1.762,91 |
| 65 | 27 | -3.448,04 | 39 | -2.034,02 | 22.2 | -3.999,81 | 37,1 | -2.289,58 |
| 70 | 23 | -3.850,51 | 37 | -2.288,19 | 17.5 | -4.487,96 | 29,2 | -3.137,13 |
| 75 | 16 | -4.650,51 | 34 | -2.532,76 | 14.9 | -4.731,07 | 25,3 | -3.540,96 |
| 80 | 9 | -5.366,72 | 32 | -2.670,89 | 13.5 | -4.849,46 | 22,8 | -3.779,73 |
| 85 | 7 | -5.558,26 | 31 | -2.849,78 | 12.3 | -4.946,04 | 20,7 | -3.985,63 |
| 90 | 6 | -5.639,09 | 28 | -3.090,41 | 11.4 | -5.017,18 | 19,0 | -4.142,41 |
| 95 | 5 | -5.723,52 | 25 | -3.384,07 | 11.1 | -5.025,74 | 18,5 | -4.166,74 |
| 100 | 3 | -5.925,96 | 23 | -3.635,94 | 9.0 | -5.240,92 | 15,2 | -4.522,56 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.

Quadro 3A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODREN para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 3, não considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODREN ^{ce(1)} | | PRODREN ^{de(2)} | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 86 | -6.034,26 | 92 | -5.580,01 | 65,5 | -8.661,25 | 94,9 | -5.311,48 |
| 10 | 76 | *-2.232,79 | 77 | *-2.086,79 | 50,4 | *-5.175,68 | 72,8 | *-2.598,32 |
| 15 | 46 | -3.941,26 | 45 | -4.056,22 | 31,2 | -5.648,38 | 47,8 | -3.731,42 |
| 20 | 31 | -4.795,49 | 36 | -4.220,69 | 19,7 | -6.097,56 | 30,8 | -4.816,53 |
| 25 | 20 | -5.537,95 | 25 | -4.944,75 | 12,6 | -6.388,93 | 19,9 | -5.544,49 |
| 30 | 9 | -6.454,45 | 19 | -5.309,44 | 8,6 | -6.501,37 | 13,5 | -5.932,14 |
| 35 | 2 | -7.010,55 | 14 | -5.616,08 | 6,1 | -6.544,63 | 9,9 | -6.107,49 |
| 40 | 2 | -6.824,08 | 9 | -6.076,84 | 2,7 | -6.739,67 | 4,8 | -6.501,74 |
| 45 | 0 | -6.908,98 | 3 | -6.521,56 | 2,7 | -6.597,40 | 4,6 | -6.382,95 |
| 50 | 0 | -6.792,95 | 1 | -6.677,99 | 2,7 | -6.483,45 | 4,5 | -6.278,54 |
| 55 | 0 | -6.698,02 | 0 | -6.698,02 | 2,3 | -6.428,92 | 3,8 | -6.261,94 |
| 60 | 0 | -6.618,92 | 0 | -6.618,92 | 0,0 | -6.618,92 | 0,0 | -6.618,92 |
| 65 | 0 | -6.551,98 | 0 | -6.551,98 | 0,0 | -6.551,98 | 0,0 | -6.551,98 |
| 70 | 0 | -6.494,60 | 0 | -6.494,60 | 0,0 | -6.494,60 | 0,0 | -6.494,60 |
| 75 | 0 | -6.444,88 | 0 | -6.444,88 | 0,0 | -6.444,88 | 0,0 | -6.444,88 |
| 80 | 0 | -6.401,37 | 0 | -6.401,37 | 0,0 | -6.401,37 | 0,0 | -6.401,37 |
| 85 | 0 | -6.362,98 | 0 | -6.362,98 | 0,0 | -6.362,98 | 0,0 | -6.362,98 |
| 90 | 0 | -6.328,86 | 0 | -6.328,86 | 0,0 | -6.328,86 | 0,0 | -6.328,86 |
| 95 | 0 | -6.298,32 | 0 | -6.298,32 | 0,0 | -6.298,32 | 0,0 | -6.298,32 |
| 100 | 0 | -6.270,84 | 0 | -6.270,84 | 0,0 | -6.270,84 | 0,0 | -6.270,84 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.

Quadro 4A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODREN para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 1, considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODREN ⁽¹⁾ | | PRODREN ⁽²⁾ | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 99 | -4.809,77 | 100 | -4.694,81 | 73,7 | -7.714,78 | 100,0 | -4.694,81 |
| 10 | 99 | 411,31 | 100 | 526,27 | 73,7 | -2.493,49 | 100,0 | 526,27 |
| 15 | 99 | 2.151,66 | 100 | 2.266,63 | 73,7 | -753,02 | 100,0 | 2.266,63 |
| 20 | 99 | 3.021,84 | 100 | 3.136,81 | 73,8 | 121,34 | 100,0 | 3.136,81 |
| 25 | 99 | 3.543,95 | 100 | 3.655,46 | 74,0 | 666,51 | 100,0 | 3.658,91 |
| 30 | 99 | 3.892,02 | 100 | 3.982,84 | 74,5 | 1.071,54 | 100,0 | 4.006,98 |
| 35 | 99 | 4.140,65 | 99 | 4.140,65 | 74,7 | 1.343,61 | 100,0 | 4.255,61 |
| 40 | 99 | 4.327,11 | 99 | 4.327,11 | 75,0 | 1.569,87 | 100,0 | 4.440,43 |
| 45 | 99 | *4.472,14 | 98 | 4.366,38 | 74,8 | 1.687,72 | 99,1 | *4.486,82 |
| 50 | 97 | 4.358,25 | 97 | *4.385,84 | 74,3 | *1.742,56 | 97,9 | 4.456,75 |
| 55 | 95 | 4.223,25 | 96 | 4.317,52 | 73,0 | 1.693,93 | 96,2 | 4.359,45 |
| 60 | 91 | 3.842,52 | 93 | 4.112,68 | 72,1 | 1.666,27 | 94,8 | 4.277,26 |
| 65 | 82 | 2.874,71 | 89 | 3.714,02 | 71,2 | 1.636,85 | 93,4 | 4.187,38 |
| 70 | 69 | 1.437,69 | 85 | 3.290,86 | 70,1 | 1.559,83 | 91,5 | 4.024,35 |
| 75 | 60 | 452,77 | 82 | 2.965,81 | 68,7 | 1.455,04 | 89,8 | 3.876,69 |
| 80 | 54 | -193,49 | 79 | 2.669,04 | 67,8 | 1.390,05 | 88,4 | 3.761,16 |
| 85 | 49 | -729,90 | 76 | 2.360,25 | 66,5 | 1.281,21 | 86,8 | 3.612,42 |
| 90 | 44 | -1.270,58 | 73 | 2.013,85 | 64,9 | 1.134,55 | 84,5 | 3.388,49 |
| 95 | 38 | -1.929,81 | 70 | 1.738,59 | 63,7 | 1.026,77 | 82,8 | 3.225,42 |
| 100 | 33 | -2.477,14 | 67 | 1.477,51 | 62,1 | 868,36 | 80,8 | 3.016,02 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.

Quadro 5A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODREN para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 2, considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODREN ⁽¹⁾ | | PRODREN ⁽²⁾ | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 90 | -5.844,42 | 97 | -5.093,73 | 59.2 | -9.389,05 | 100,0 | -4.694,81 |
| 10 | 90 | -623,34 | 97 | 126,20 | 59.2 | -4.166,97 | 100,0 | 526,27 |
| 15 | 90 | 1.117,02 | 96 | 1.812,53 | 59.2 | -2.419,70 | 100,0 | 2.266,63 |
| 20 | 90 | 1.987,20 | 95 | 2.514,87 | 59.3 | -1.540,35 | 99,9 | 3.122,48 |
| 25 | 90 | 2.509,30 | 92 | *2.762,22 | 58.9 | -1.070,81 | 97,7 | 3.509,03 |
| 30 | 90 | 2.857,38 | 88 | 2.635,50 | 58.0 | -821,78 | 96,9 | *3.655,27 |
| 35 | 89 | *2.991,04 | 82 | 2.205,86 | 56.5 | *-748,67 | 94,2 | 3.589,16 |
| 40 | 84 | 2.602,70 | 76 | 1.625,53 | 54.5 | -790,24 | 90,9 | 3.392,93 |
| 45 | 72 | 1.368,20 | 69 | 1.030,22 | 52.1 | -925,01 | 86,7 | 3.060,45 |
| 50 | 54 | -585,07 | 62 | 323,12 | 49.4 | -1.115,56 | 82,9 | 2.732,83 |
| 55 | 46 | -1.409,83 | 56 | -245,27 | 45.7 | -1.445,36 | 77,4 | 2.204,22 |
| 60 | 38 | -2.250,41 | 51 | -717,98 | 36.0 | -2.484,04 | 64,0 | 743,18 |
| 65 | 32 | -2.873,23 | 48 | -1.085,59 | 32.9 | -2.769,74 | 59,4 | 278,25 |
| 70 | 29 | -3.160,74 | 43 | -1.526,00 | 30.3 | -3.014,14 | 54,5 | -224,91 |
| 75 | 26 | -3.455,90 | 41 | -1.729,19 | 27.9 | -3.239,20 | 50,7 | -612,86 |
| 80 | 18 | -4.332,08 | 39 | -1.951,24 | 26.2 | -3.395,06 | 48,0 | -882,34 |
| 85 | 13 | -4.868,49 | 36 | -2.215,19 | 23.9 | -3.620,00 | 44,0 | -1.307,62 |
| 90 | 12 | -4.949,33 | 34 | -2.456,98 | 20.6 | -3.961,90 | 36,0 | -2.194,02 |
| 95 | 8 | -5.378,64 | 32 | -2.655,22 | 17.0 | -4.341,04 | 29,9 | -2.862,27 |
| 100 | 6 | -5.581,08 | 30 | -2.828,92 | 13.6 | -4.710,66 | 24,9 | -3.409,66 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.

Quadro 6A - Produtividade relativa total média (YTm) para a cultura do milho e valor presente médio (VPm) estimados pelos modelos SIMDRENO, DRAINMOD e PRODRENce para diferentes espaçamentos entre os drenos (Esp), para o solo 3, considerando o escoamento superficial

| Esp (m) | SIMDRENO | | DRAINMOD | | PRODRENce ⁽¹⁾ | | PRODRENde ⁽²⁾ | |
|------------|------------|-----------------|------------|-----------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|-----------------|
| | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) | YTm (%) | VPm (R\$/ha) |
| 5 | 85 | -6.419,22 | 93 | -5.460,45 | 53,8 | -10.003,37 | 100,0 | -4.694,81 |
| 10 | 85 | -1.198,15 | 84 | *-1.272,87 | 53,8 | -4.782,45 | 100,0 | 526,17 |
| 15 | 85 | 542,21 | 67 | -1.573,07 | 53,2 | -3.116,24 | 98,8 | 2.132,62 |
| 20 | 85 | *1.412,39 | 47 | -2.951,52 | 51,8 | -2.406,37 | 96,3 | 2.708,70 |
| 25 | 78 | 1.129,78 | 33 | -4.052,66 | 50,2 | *-2.066,93 | 93,4 | *2.901,96 |
| 30 | 61 | -476,49 | 27 | -4.438,04 | 44,8 | -2.335,23 | 81,9 | 1.920,51 |
| 35 | 42 | -2.412,12 | 22 | -4.732,03 | 39,6 | -2.685,26 | 72,7 | 1.118,41 |
| 40 | 22 | -4.524,87 | 19 | -4.888,14 | 32,5 | -3.319,49 | 59,6 | -203,95 |
| 45 | 14 | -5.299,52 | 17 | -4.986,83 | 30,0 | -3.462,64 | 54,4 | -654,84 |
| 50 | 7 | -5.988,23 | 15 | -5.073,14 | 26,4 | -3.757,38 | 47,7 | -1.307,61 |
| 55 | 3 | -6.353,14 | 13 | -5.181,69 | 22,8 | -4.082,38 | 41,2 | -1.961,71 |
| 60 | 3 | -6.274,03 | 11 | -5.327,91 | 17,4 | -4.622,57 | 32,8 | -2.848,85 |
| 65 | 3 | -6.207,10 | 9 | -5.497,79 | 13,6 | -4.985,35 | 27,6 | -3.380,67 |
| 70 | 2 | -6.264,68 | 8 | -5.564,57 | 9,9 | -5.355,11 | 19,6 | -4.243,88 |
| 75 | 0 | -6.444,88 | 7 | -5.660,85 | 8,0 | -5.527,86 | 16,9 | -4.508,15 |
| 80 | 0 | -6.401,37 | 6 | -5.705,86 | 5,3 | -5.789,23 | 12,7 | -4.937,07 |
| 85 | 0 | -6.362,98 | 5 | -5.759,44 | 1,8 | -6.151,76 | 6,5 | -5.616,56 |
| 90 | 0 | -6.328,86 | 5 | -5.760,95 | 1,7 | -6.130,96 | 6,2 | -5.614,36 |
| 95 | 0 | -6.298,32 | 5 | -5.755,71 | 1,1 | -6.172,77 | 4,7 | -5.761,59 |
| 100 | 0 | -6.270,84 | 4 | -5.744,21 | 1,1 | -6.147,77 | 4,6 | -5.744,73 |

* Valor presente máximo.

(1) Considerando o estresse devido à deficiência de água no solo.

(2) Desconsiderando o estresse devido à deficiência de água no solo.