



Desenvolvimento e aplicação de metodologia para dimensionamento de sistemas de drenagem agrícola¹



Adão W. P. Evangelista², Paulo A. Ferreira³, Fernando F. Pruski³ & Gilberto C. Sedyama³

¹ Parte da tese do autor apresentada à UFV, para obtenção do título de "Doctor Scientiae", Pesquisa financiada pela FAPEMIG

² DEG/UFLA, CP 37, 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1666. E-mail: awpego@ufla.br (Foto)

³ DEA/UFV, Av. P.H. Rolfs s/n, 36571-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899 2729. E-mail: dea@ufv.br

Protocolo 7 - 5/2/2004 - Aprovado em 6/5/2005

Resumo: As condições climáticas dos trópicos vêm despertando a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias, que contribuam para o aprimoramento dos métodos até então empregados no dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola. Tendo em vista que as regiões brasileiras de clima úmido e subúmido se incluem neste contexto, desenvolveu-se uma metodologia fundamentada no critério de drenagem SEW_{30} , no balanço de água no solo e na equação de drenagem de Krayjenhoff van Leur-Maasland. O efeito do espaçamento e da profundidade dos drenos sobre a produtividade das culturas foi caracterizado com base nos valores do SEW_{30} calculado a partir do hidrograma freático, gerado durante o período de desenvolvimento da cultura. Numa segunda etapa, o valor de SEW_{30} calculado foi comparado com os valores experimentais, determinados para a cultura e tipo de solo de várzea em questão. Quando os valores calculados de SEW_{30} não coincidem com os experimentais, um novo valor de espaçamento foi testado, de forma iterativa, até se obter diferença aceitável. Os espaçamentos entre drenos obtidos pela aplicação da metodologia proposta foram maiores que aqueles resultantes da aplicação de critérios tradicionais de drenagem.

Palavras-chave: modelo de simulação, balanço hídrico, critério de drenagem SEW_{30}

Development and application of methodology for design of agricultural drainage systems

Abstract: The tropical climatic conditions have risen the need for developing new technologies that contribute for the improvement of the methods still employed in design and management of agricultural drainage systems. Considering the Brazilian humid and subhumid climatic regions, a methodology was developed based on the drainage criteria SEW_{30} , the water balance and the drainage equation of Krayjenhoff van Leur-Maasland. The effects of spacing and depth of drains on productivity of crops for a critical period of drainage was characterized basing on the value of SEW_{30} calculated from the water table hydrogram during development period of the crop. In the second stage the calculated value of SEW_{30} was compared to experimental value determined for the crop and soil type. When the calculated values of SEW_{30} did not match with the experimental values, a new value of spacing was tested in the iterative form until agreeable difference is obtained. The space between drains obtained through application of proposed methodology was larger than the one obtained by traditional drainage criteria.

Key words: simulation model, water balance, drainage criteria SEW_{30}

INTRODUÇÃO

O principal objetivo que se almeja através da drenagem agrícola é criar um ambiente favorável ao crescimento das plantas e preservar as propriedades físicas e químicas do solo. A necessidade de drenagem varia de acordo com o clima da região. A drenagem é necessária em regiões de clima úmido e

subúmido, para eliminar o excesso de água na superfície e no perfil do solo e, em regiões de clima árido e semi-árido, para manter a concentração de sais na solução do solo em níveis toleráveis para as plantas (Ferreira, 2003).

Uma das maiores limitações aos projetos de drenagem agrícola implementados em regiões tropicais, tem sido a ausência de metodologias confiáveis que representem os requerimentos

de drenagem do solo para o desenvolvimento das diversas culturas, sob condições locais.

Os projetos de drenagem agrícola que vêm sendo executados no Brasil nas últimas décadas, são dimensionados por meio de metodologias tradicionais de drenagem, desenvolvidas para os Estados Unidos e Europa, onde as condições climáticas diferem bastante da brasileira; assim, na maioria das vezes a utilização dessas metodologias resulta na implementação de um projeto superdimensionado, o que inviabiliza sua execução quanto ao aspecto econômico; por esta razão, o engenheiro menospreza o conhecimento teórico de drenagem, preferindo basear-se em sua experiência prática a fim de tornar a execução do projeto economicamente viável.

A limitada aplicação de procedimentos científicos no dimensionamento dos sistemas de drenagem pode ser atribuída a vários fatores, entre eles a complexibilidade das relações entre a produtividade das culturas e o potencial de água no solo; a dificuldade em prever a distribuição da água no perfil do solo em relação à intensidade de drenagem; e o custo das investigações de campo, necessárias a um dimensionamento mais racional (Bower, 1974), dentre outros.

As principais fontes que contribuem para o excesso de água no solo são as precipitações e as infiltrações provenientes de canais de irrigação e represas. Em regiões de clima árido e semi-árido, comumente a principal fonte causadora do excesso de água no solo é a irrigação, enquanto em regiões de clima úmido e subúmido é a precipitação (Bernardo, 1995).

Para relacionar o excesso de água no solo à movimentação do lençol freático, alguns métodos foram desenvolvidos com o objetivo de se avaliar a dinâmica da água no solo, e relacioná-la aos aspectos climáticos, aos parâmetros físico-hídricos do solo e, da cultura, e aos parâmetros geométricos do sistema de drenagem. Esses métodos são importantes ao dimensionamento e implantação de projetos eficientes de drenagem (Sabbagh et al., 1993).

Nos últimos anos e mediante o desenvolvimento acelerado dos recursos computacionais, foi possível se construir modelos baseados nas teorias de drenagem agrícola, a fim de simular a movimentação do lençol freático e o escoamento subterrâneo e superficial, em função dos elementos climáticos, das características do solo e do sistema de drenagem. Dentre esses modelos, merecem destaque: DRAINMOD (Skaggs, 1981), SWATREN (Workman & Skaggs, 1989), SIMDRENO (Duarte, 1997), SISDRENA (Miranda, 1997) e o PRODREN (Borges Júnior, 2000).

O modelo computacional SIMDRENO (Duarte, 1997) foi desenvolvido em linguagem Pascal e simula a posição do lençol freático e a umidade do solo na zona radicular a partir de séries históricas de dados diários de precipitação, evapotranspiração, parâmetros físico-hídricos do solo, cultura e geometria do sistema de drenagem. O modelo estima a fração de precipitação que escoar superficialmente empregando o método do número da curva, calcula a posição do lençol freático e estima a umidade do solo na zona radicular, com base no balanço hídrico. Por meio de valores experimentais que expressam a sensibilidade das culturas ao excesso e à falta de umidade no solo, o modelo estima a produtividade relativa esperada, realiza uma análise

econômica e informa qual o sistema de drenagem mais viável para a situação.

Borges Júnior (2000) visando suprir lacunas em relação ao modelo SIMDRENO, no que tange à facilidade na comunicação com o usuário, reescreveu-o em linguagem Delphi, denominando-o PRODREN. As principais limitações desses modelos é a ausência no Brasil de dados observados diários de elementos climáticos e da sensibilidade das culturas ao excesso e à falta de umidade no solo, por outro lado, os modelos estimam o escoamento superficial pelo método do número da curva, que tende a superestimar o escoamento superficial e subestimar a infiltração da água no solo, contribuindo assim, para o cálculo de espaçamentos entre drenos maiores que os recomendados.

Tendo em vista a necessidade de se desenvolver, para as condições de clima subúmido e úmido das regiões tropicais, metodologias em drenagem agrícola compatíveis com o clima, solos e culturas dessas regiões, objetivou-se, com este trabalho: a) desenvolver uma metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola, fundamentada no balanço hídrico diário e nos tipos de solo e cultura; b) aplicar a metodologia na região de Viçosa, MG, e c) comparar os espaçamentos de drenos, calculados pela metodologia desenvolvida com aqueles resultantes da aplicação da metodologia tradicional.

MATERIAL E MÉTODOS

Desenvolvimento da metodologia

A metodologia proposta para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola fundamenta-se no critério de drenagem SEW_{30} - somatório dos excessos de água no solo acima da profundidade de 30 cm, no balanço de água no solo e na equação de drenagem de Krayjenhoff van Leur-Maasland. Para obtenção do índice SEW_{30} , são realizados o balanço hídrico diário no solo, na região do sistema radicular, e o cálculo da posição diária do lençol freático.

Os componentes do balanço hídrico são contabilizados diariamente em um volume de controle de base unitária, localizado equidistante a dois drenos paralelos, estendendo-se desde a camada impermeável até a superfície do solo. Esses componentes são: o total precipitado diário, a infiltração, o armazenamento de água na zona radicular, o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático para a zona radicular, a evapotranspiração diária e a drenagem.

O balanço de água na zona radicular é realizado considerando-se a fração da precipitação pluvial diária, ou lâmina de irrigação infiltrada que, efetivamente, provoca a recarga do lençol freático, a evapotranspiração real diária e o fluxo ascendente máximo proveniente do lençol freático.

A posição diária do lençol freático (Figura 1) em resposta às recargas efetivas, é calculada utilizando-se a equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van Leur-Maasland, durante o ciclo da cultura, para determinada profundidade dos drenos e coeficiente de armazenamento.

Os efeitos da relação entre a profundidade do lençol freático e a produtividade da cultura, são caracterizados com base no valor de SEW_{30} , calculado a partir do hidrograma freático,

gerado durante o período de desenvolvimento da cultura (Figura 1). Numa segunda etapa, o valor calculado de SEW_{30} é comparado com valores experimentais determinados para a cultura e tipo de solo em questão. Quando o valor calculado de SEW_{30} não coincide com os experimentais, um novo valor de espaçamento é testado, de forma iterativa, até se obter uma diferença aceitável.

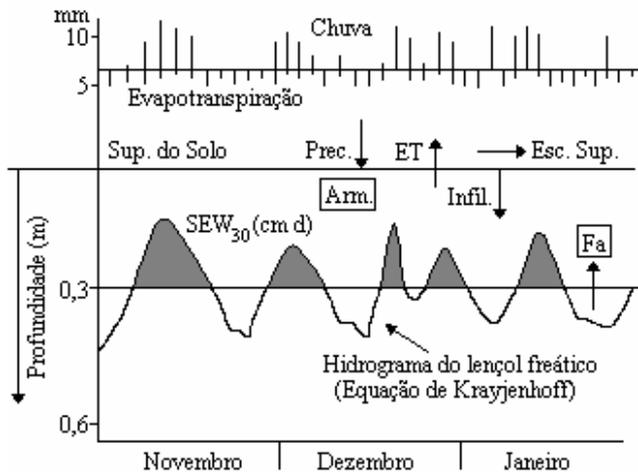


Figura 1. Hidrograma freático e índice SEW_{30}

Infiltração da água no solo

A infiltração da água no solo é calculada a partir da equação de Green-Ampt modificada por Mein & Larson (1973), indicada a seguir:

$$TI = K_z \left[1 + \frac{0,01h_f(\theta_s - \theta_i)}{I} \right] \quad (1)$$

em que:

- TI - taxa de infiltração de água no solo, mm h⁻¹
- K_z - condutividade hidráulica do solo, na direção vertical, mm h⁻¹
- h_f - componente matricial do potencial da água no solo na frente de umedecimento, kPa
- θ_s - teor de água no solo correspondente à saturação, m³ m⁻³
- θ_i - teor de água no solo no início do processo de infiltração, m³ m⁻³
- I - infiltração acumulada, mm

Os valores dos parâmetros K_z e h_f utilizados foram os recomendados por Cecilio (2002), ou seja, K_z igual a 0,5 K_0 associado a h_f igual a $h_f(\theta_i)$.

Durante a precipitação, quando a intensidade da chuva (i_p) é menor que a capacidade de infiltração da água no solo (CI), a lâmina infiltrada é considerada igual à lâmina precipitada no intervalo de tempo; caso contrário, a lâmina infiltrada é calculada integrando-se a função da taxa de infiltração no intervalo de tempo considerado.

Perfil de precipitação

O perfil instantâneo de precipitação necessário ao cálculo da infiltração da água no solo, é gerado a partir do modelo

proposto por Nicks et al. (1995). O modelo utiliza, para este fim, uma função dupla exponencial. A função se baseia em duas variáveis padronizadas, ou seja, na intensidade máxima instantânea de precipitação (i_p^*) e no tempo de ocorrência da intensidade máxima instantânea de precipitação (t_p^*).

A função dupla exponencial compreende as seguintes equações:

$$i(t) = \begin{cases} a e^{bt} & \dots\dots\dots 0 \leq t \leq t_p \\ c e^{-d t} & \dots\dots\dots t_p < t \leq 1,0 \end{cases} \quad (2)$$

em que:

- $i(t)$ - intensidade de precipitação padronizada, decimal
- a, b, c e d - parâmetros do modelo a serem determinados

Evapotranspiração de referência (ET_0)

A evapotranspiração de referência (ET_0) é estimada aplicando-se o modelo proposto por Penman - Monteith padrão FAO, conforme Allen et al. (1998), ou seja:

$$ET_0 = \frac{0,408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (3)$$

em que:

- ET_0 - evapotranspiração de referência, mm d⁻¹
- s - declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C⁻¹
- R_n - saldo de radiação, MJ m⁻² d⁻¹
- G - fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹
- γ - coeficiente psicrométrico, kPa °C⁻¹
- T - temperatura média do ar, °C
- U_2 - velocidade média do vento a 2 m de altura, m s⁻¹
- e_a - pressão parcial de vapor, kPa
- e_s - pressão de saturação de vapor, kPa

Fluxo ascendente máximo

A metodologia utilizada para se calcular o fluxo ascendente máximo é semelhante àquela utilizada no modelo DRAINMOD, descrita por Skaggs (1981); baseia-se na geração de uma tabela contendo valores do fluxo ascendente máximo do lençol freático em direção à zona radicular, para diferentes profundidades do lençol freático, empregando-se a equação de Darcy resolvida por diferenças finitas. A função utilizada para representar a curva de retenção de água no solo segue o modelo de van Genuchten (1980). É utilizado, ainda, o modelo de Mualem (1976) para representar a condutividade hidráulica do solo não-saturado, em função do potencial matricial. Uma vez conhecida a profundidade diária do lençol freático, obtém-se o fluxo ascendente máximo diário proveniente do lençol freático, interpolando-se os valores da tabela.

Comparação entre fluxo ascendente máximo e a evapotranspiração real

Nesta etapa é calculada, para cada dia, a fração da evapotranspiração real que será suprida pela ascensão capilar proveniente do lençol freático. Quando a evapotranspiração real (ET_r) for menor que o fluxo ascendente máximo, a ET_r será suprida integralmente pelo lençol freático; portanto, não provocando diminuição no conteúdo de água na zona radicular; caso contrário, quando o fluxo ascendente máximo satisfaz apenas uma fração da ET_r, a fração restante provoca redução no conteúdo de água da zona radicular.

Posição diária do lençol freático

A posição diária do lençol freático em resposta às recargas efetivas é calculada utilizando-se a equação de recarga intermitente de Krayjenhoff van Leur-Maasland, durante o período crítico de drenagem, isto é:

$$h_{lf} = \frac{4rec}{\pi\mu_d} j \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{1}{n^3} \left(e^{\frac{n^2}{j} b_r} - 1 \right) e^{-\frac{n^2}{j} t_{rec}} \quad (4)$$

em que:

- h_{lf} - altura do lençol freático sobre o plano que passa pelos drenos em resposta a uma recarga, m
- rec - recarga efetiva de intensidade constante, m d⁻¹
- μ_d - porosidade drenável do solo, cm³ cm⁻³
- b_r - duração da recarga, d
- t_{rec} - período de tempo contado desde o início da recarga, d
- j - fator de armazenamento, d

Soma do excesso de água (SEW₃₀)

O SEW₃₀ é um índice utilizado para quantificar as condições de excesso de água na zona radicular, durante o ciclo da cultura. É expresso por:

$$SEW_{30} = \sum_{j=1}^m (30 - X_j) \quad (5)$$

em que:

- SEW₃₀ - somatório dos excedentes de água acima da profundidade de 30 cm, cm d
- X_j - profundidade média do lençol freático durante o dia j , cm
- m - número de dias em que o lençol freático permanece acima da profundidade de 30 cm, durante o ciclo da cultura

Programa computacional

Foi desenvolvido um programa computacional denominado SDA (Sistemas de Drenagem Agrícola), objetivando realizar os cálculos pertinentes a cada etapa da metodologia, além de integrá-la de modo a conseguir uma comunicação amigável com o usuário. Foi desenvolvido em linguagem Delphi, contendo telas de entrada e saída de dados.

Os parâmetros de entrada são: precipitação total diária, mm; duração da precipitação, h; intensidade máxima de precipitação padronizada, adimensional; tempo padronizado de ocorrência

da intensidade máxima de precipitação, adimensional; temperatura máxima do ar, °C; temperatura mínima do ar, °C; temperatura do ponto de orvalho, °C; radiação solar, MJ m⁻² d⁻¹; velocidade do vento a 2 m de altura, m s⁻¹; condutividade hidráulica do solo saturado, m d⁻¹; profundidade da camada impermeável, m; valor inicial de espaçamento entre drenos, m; profundidade de instalação dos drenos, m; raio efetivo dos drenos, m; curva de retenção de água no solo; data do plantio e colheita da cultura; valor de SEW₃₀ experimental, cm d; profundidade efetiva do sistema radicular da cultura, m e teor de água no solo no dia inicial, adimensional. A Figura 2 apresenta o fluxograma resumido do programa.

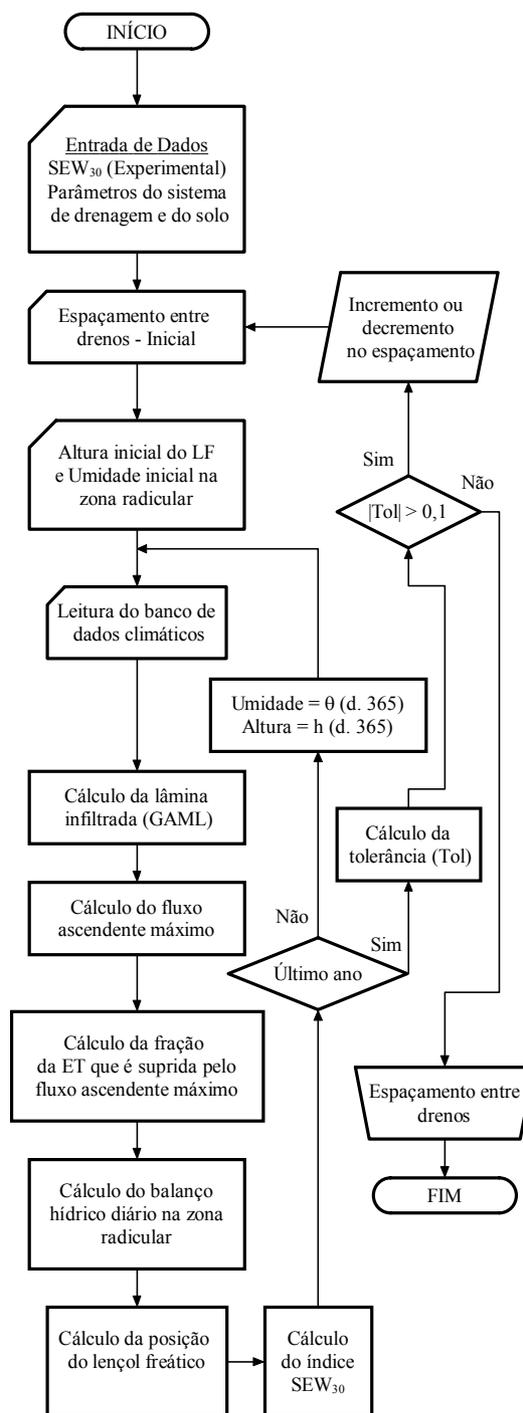


Figura 2. Fluxograma do programa computacional

Aplicação da metodologia

A fim de se comparar os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia proposta com aqueles obtidos por meio de metodologias de dimensionamento tradicionais, realizaram-se simulações por meio do programa, através de dados climáticos da região de Viçosa, MG. A base de dados utilizada nas simulações é descrita a seguir:

Base de dados

a) Clima: Utilizaram-se séries sintéticas de dados diários de radiação solar, temperatura máxima e mínima do ar, temperatura do ponto de orvalho, velocidade do vento, precipitação total diária, duração da precipitação, intensidade máxima de precipitação e o tempo para sua ocorrência. Esses dados foram gerados através do modelo CLIGEN, para o período de 50 anos.

Os dados de entrada do modelo CLIGEN, ou seja, a média mensal, o desvio padrão e o coeficiente de assimetria da precipitação total, das temperaturas máxima e mínima do ar, da temperatura do ponto de orvalho, da velocidade do vento, além da probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o anterior chuvoso e da probabilidade de um dia ser chuvoso, tendo sido o anterior seco, foram obtidos a partir da série histórica da região de Viçosa, para o período de 1972 a 2001, no total de 30 anos. As informações relativas à duração dos eventos de precipitação, a intensidade máxima instantânea de precipitação e o tempo para a sua ocorrência, foram extraídas de dados pluviográficos.

b) Solo e cultura: Características físicas de cinco solos foram usadas como parâmetros de entrada no programa.

Os solos foram: 1) Latossolo Vermelho Amarelo Álico – Viçosa; 2) Podzólico Vermelho Amarelo – Leopoldina; 3) Latossolo Vermelho Amarelo – Viçosa; 4) Podzólico Vermelho Amarelo – Viçosa; 5) Podzólico Vermelho Amarelo Câmbico – Ponte Nova.

As culturas usadas foram: milho, cana-de-açúcar e cenoura.

As funções que relacionam a produtividade relativa com os valores de SEW_{30} , assim com os respectivos valores de SEW_{30} experimentais utilizados neste trabalho, foram obtidos por Skaggs (1981), Carter & Camp (1994) e Vildoso (1995), ou seja, 242, 200, e 122,45 cm d para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura, respectivamente.

A Tabela 1 apresenta os teores volumétricos de água relativos à saturação, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e em equilíbrio com o componente matricial de -6 kPa, para os cinco solos.

Tabela 1. Teores volumétricos de água (m^3m^{-3}) relativos à saturação (θ_s), capacidade de campo (θ_{cc}), ponto de murcha permanente (θ_{pm}) e em equilíbrio com o componente matricial de -6 kPa (θ_{pd}) para diferentes solos

Solo	Teor de água			
	θ_s	θ_{pd}	θ_{cc}	θ_{pm}
Solo 1	0,450	0,352	0,331	0,255
Solo 2	0,674	0,636	0,611	0,329
Solo 3	0,312	0,255	0,239	0,206
Solo 4	0,542	0,487	0,460	0,409
Solo 5	0,360	0,270	0,250	0,169

Os valores de condutividade hidráulica do solo saturado, para os solos de 1 a 5, são 0,50; 1,50; 1,00; 1,42 e 0,80 $m d^{-1}$, respectivamente.

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

c) Sistemas de drenagem: O programa foi rodado para sistemas de drenagem que apresentam as seguintes características: profundidade dos drenos de 1,4 m nas áreas cultivadas com milho e cana-de-açúcar, e 1,2 m nas áreas cultivadas com cenoura; e diâmetros de drenos laterais de 0,10 m.

Os espaçamentos obtidos utilizando-se a metodologia proposta, foram comparados com os espaçamentos indicados pelos métodos de dimensionamento propostos por Pizarro (1985) e Cruciani (1989).

Na metodologia proposta por Pizarro (1985), para cada tipo de cultura são estabelecidas profundidades mínimas, nas quais o lençol freático deve estar em um, dois e três dias, transcorridos após uma chuva de um dia, com probabilidade de ser igualada ou superada em média cinco vezes ao ano. Esta lâmina de chuva para a região de Viçosa é de 40 mm. Neste critério não se considera o escoamento superficial, mas, sim, que toda precipitação se infiltra no solo.

Pelo critério proposto por Cruciani (1989), conforme o tipo de cultura são estabelecidas taxas de rebaixamento do lençol freático após uma chuva de 24 h, com período de retorno igual a cinco anos. Para a região de Viçosa, esta precipitação é 98,2 mm. No cálculo da recarga efetiva do lençol freático, o autor sugere ainda a possibilidade de se abater, da precipitação total, uma fração correspondente ao escoamento superficial. No cálculo do espaçamento entre drenos em que se empregou o método sugerido por Cruciani (1989) na condição de existência de escoamento superficial, segundo a metodologia, foram subtraídos 50, 35, 40, 37, e 45% da chuva de projeto, para os solos 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente. Esses valores correspondem à ordem de grandeza dos coeficientes de escoamento superficial “C”, relativos à Fórmula Racional.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da metodologia com vistas ao dimensionamento e ao manejo de culturas

Objetivando-se uma avaliação da metodologia desenvolvida, realizou-se a análise a seguir, baseada nos resultados obtidos em parte da base de dados apresentada anteriormente, na qual se utilizaram: cultura do milho (profundidade do sistema radicular igual a 1,10 m) com semeadura no dia 8 de outubro (dia 100) e colheita no dia 14 de fevereiro (dia 230), totalizando o ciclo de 130 dias; sistemas de drenagem, constituídos por drenos laterais cobertos, instalados a uma profundidade de 1,40 m e diâmetro efetivo de 0,10 m; solo Podzólico Vermelho Amarelo - Leopoldina e série sintética de elementos climáticos, da região de Viçosa, gerados pelo modelo CLIGEN, para o período de 50 anos. O valor do espaçamento entre drenos obtido para o valor experimental de SEW_{30} , foi 71 m. A seguir, são mostrados os resultados referentes ao primeiro ano de simulação.

Valores de precipitação e evapotranspiração de referência

A precipitação acumulada durante o período foi de 1.106,3 mm e, durante o ciclo da cultura, de 717 mm, e a evapotranspiração de referência média foi 3,6 mm.

Armazenamento de água na região radicular

As variações da lâmina de água armazenada na região do sistema radicular da cultura ao longo de seu ciclo, são apresentadas na Figura 3.

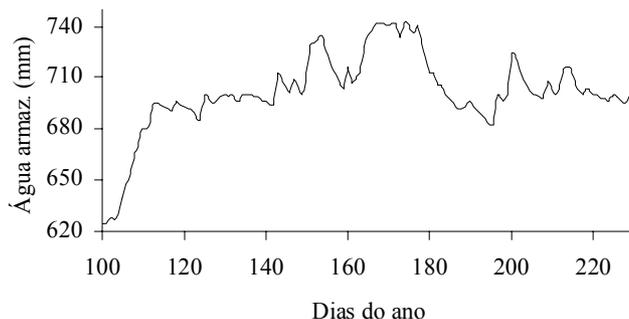


Figura 3. Água armazenada na região do sistema radicular da cultura do milho, referente ao primeiro ano de simulação para o solo Podzólico Vermelho Amarelo – Leopoldina

O espaçamento entre drenos, por si só, não permite evidenciar o comportamento dinâmico do lençol freático que, em última análise, traduz as condições de estresse devido ao excesso ou à falta de água à qual a cultura foi submetida. Dentro desse contexto e se analisando a Figura 3, verifica-se que, no período de plantio e na fase de estabelecimento da cultura (dias 100 a 125), o teor de água armazenado na região do sistema radicular da cultura é baixo e o lençol freático se encontra profundo (Figura 4). Este fato pode contribuir expressivamente para o estresse da cultura devido à deficiência de água na região radicular, com conseqüente diminuição na produtividade, caso em que uma das medidas corretivas poderia ser a utilização da prática da subirrigação (nos dias em que o lençol freático se encontra acima do plano que passa pelo fundo dos drenos), através do controle do lençol freático, por meio de estruturas especiais instaladas ao longo dos drenos. Da mesma forma, esta técnica também pode ser utilizada em períodos de veranico, ocorridos durante os períodos de maior exigência hídrica da cultura. Por outro lado observa-se, ainda na Figura 3, que no

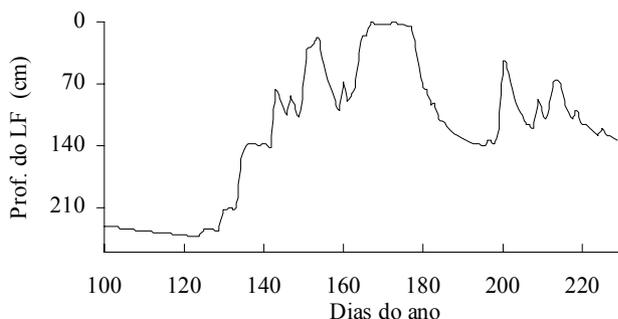


Figura 4. Variação das profundidades do lençol freático durante o ciclo da cultura do milho, referente ao primeiro ano de simulação

período de floração da cultura e formação de grãos (dias 150 a 200) o solo permanece com alto teor de água por um tempo prolongado, em razão das altas lâminas de precipitação ocorridas neste período, o que pode contribuir também para a redução da produtividade da cultura, em virtude do excesso de água no solo. Na tentativa de resolver este problema, uma das alternativas mais viáveis seria o planejamento da época de plantio, de forma que este período chuvoso não coincidissem com o período crítico para a cultura; caso, por algum motivo, esta alternativa não possa ser utilizada, uma outra seria, utilizar uma outra cultura menos sensível ao excesso de água.

Efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático

Outro aspecto importante a considerar, refere-se aos efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático. Durante o ciclo da cultura, uma razoável lâmina de água proveniente do lençol freático (Figura 5) e da região radicular foi evapotranspirada contribuindo, desta forma, para evitar a ocorrência de excesso de água no solo e a conseqüente elevação do lençol freático. Cabe aqui ressaltar que as metodologias tradicionais, na sua totalidade desenvolvidas para regiões de clima temperado e com ênfase na primavera, quando do derretimento da neve, desconsideram esses efeitos da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático. Este fato pode contribuir para a obtenção de resultados de espaçamentos entre drenos menores que os recomendados, conduzindo a uma drenagem em excesso na área em questão, nas regiões tropicais e, por conseqüência, aumento dos custos de implantação e manutenção do sistema. Ainda dentro deste contexto, algumas metodologias tradicionais, como a apresentada por Pizarro (1985), tendem excessivamente a favor da segurança, por não considerar, ainda, outros aspectos significativos que interferem no desempenho dos sistemas de drenagem, tais como o escoamento superficial, o que pode contribuir ainda mais para o superdimensionamento dos sistemas de drenagem agrícola.

Somatório do excesso de água no solo (SEW_{30}) e oscilações do lençol freático

As oscilações do lençol freático podem propiciar situações de estresse, não somente devido ao excesso de água como, também, de déficit, alternadamente ocorridas durante o ciclo de uma cultura. Embora sejam necessárias informações de

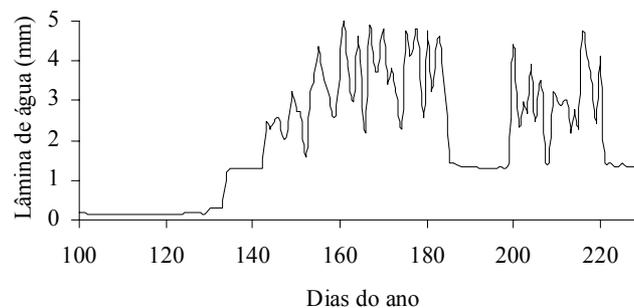


Figura 5. Lâmina de água evapotranspirada, proveniente do lençol freático, durante o primeiro ano simulado, para a região de Viçosa, MG

tolerância das culturas, tanto ao excesso quanto ao déficit de água, este trabalho enfatiza a tolerância ao excesso de água.

A Figura 6 mostra o índice SEW_{30} e a variação da posição diária do lençol freático em resposta às recargas efetivas (Figura 7), durante o ciclo da cultura, para o primeiro ano de simulação. Apesar do valor do índice SEW_{30} calculado (210 cm d, $L = 73$) aproximar-se do experimental recomendado para a cultura do milho (200 cm d, Figura 6), evidencia-se deficiência deste índice no estudo da resposta das culturas à flutuação do lençol freático, que se refere ao fato deste assumir que o estresse imposto à cultura pela flutuação do lençol freático deve ser aditivo, implicando no fato de que valores iguais de SEW_{30} obtidos a partir de diferentes níveis de drenagem, podem produzir níveis de estresse iguais na cultura. Por exemplo, para culturas num mesmo estágio de crescimento, o método sugere que um lençol freático mantido a 5 cm de profundidade por um dia ($SEW_{30} = 25$ cm d) tem o mesmo efeito que um lençol freático mantido a 25 cm de profundidade durante cinco dias ($SEW_{30} = 25$ cm d), o que pode não ser verdadeiro, dependendo do estágio de desenvolvimento da cultura. Segundo Skaggs (1981), apesar dos pontos vulneráveis, o índice SEW_{30} é considerado um critério conveniente para caracterizar a qualidade da drenagem.

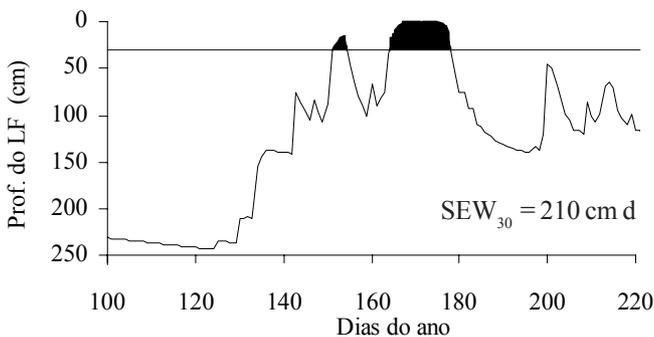


Figura 6. Hidrograma freático e índice SEW_{30} durante o ciclo da cultura do milho, referentes ao primeiro ano da simulação para o solo Podzólico Vermelho Amarelo – Leopoldina

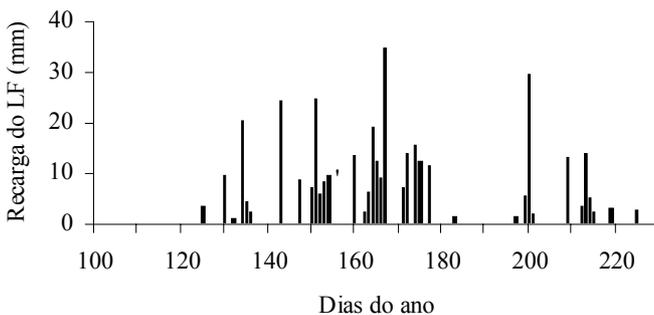


Figura 7. Recargas efetivas do lençol freático durante o ciclo da cultura do milho, referentes ao primeiro ano de simulação para o solo Podzólico Vermelho Amarelo – Leopoldina

Destaca-se que o exemplo anterior, quando a simulação foi realizada somente para um ano, objetivava apenas ilustrar o controle que esta ferramenta oferece sobre os principais fatores que influenciam o desempenho de sistema de drenagem agrícola, auxiliando de forma expressiva na tomada de decisões a ser realizada pelo projetista.

A seguir, vê-se o dimensionamento final, considerando-se todos os anos da série.

Os valores de SEW_{30} calculados para 50 anos de simulação são mostrados na Figura 8. A média desses valores (200 cm d) corresponde, segundo Skaggs (1981), ao valor de SEW_{30} experimental recomendável para a cultura do milho, sem que haja queda acentuada na produtividade. De modo geral, a utilização desse valor médio de SEW_{30} pode acarretar queda de produtividade em anos considerados chuvosos e, ao contrário, caso não haja déficit hídrico, aumento de produtividade em anos pouco chuvosos. Desta forma, como o número de anos utilizados na simulação pode ser considerado representativo, espera-se que, a longo prazo, o sistema de drenagem dimensionado utilizando a metodologia desenvolvida, propicie uma agricultura permanente e rentável na área em questão.

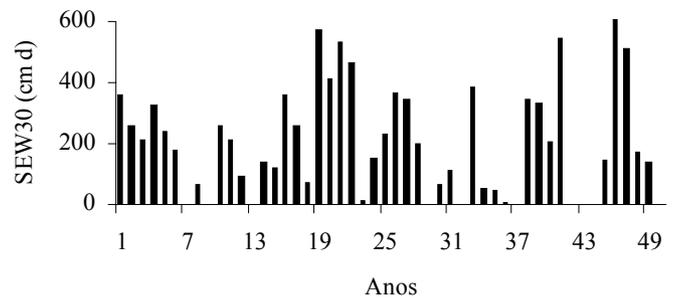


Figura 8. Variação do índice SEW_{30} , durante os 50 anos de simulação

O valor do espaçamento entre drenos obtido com a referente simulação para o valor experimental de SEW_{30} , foi 71 m.

Comparações entre dimensionamentos realizados com base na metodologia desenvolvida e naqueles com base na metodologia tradicional

Na Tabela 2 encontra-se o resumo dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia aqui desenvolvida e dos métodos apresentados por Pizarro (1985) e Cruciani (1989), em condições de ausência e presença de escoamento superficial.

Na condição de ausência de escoamento superficial considerou-se a infiltração total da lâmina de precipitação, caso em que se observa que os espaçamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura foram, respectivamente, em média 30, 47 e 64% maiores que os espaçamentos entre drenos obtidos utilizando-se o método de dimensionamento proposto por Pizarro (1985) e 79, 101 e 151% maiores que os obtidos utilizando-se o método proposto por Cruciani (1989). Ressalta-se que, em se tratando de dimensionamento de sistema de drenagem subterrânea, a não consideração do escoamento superficial incorre em maior segurança.

Tendo em vista o escoamento superficial, verificou-se que os espaçamentos entre drenos obtidos pela metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura foram, em média, respectivamente, 99, 127 e 133% maiores que os espaçamentos entre drenos obtidos por meio do método de dimensionamento proposto por Cruciani (1989). Observa-se que as variações foram menores em relação às

Tabela 2. Espaçaamentos entre drenos (m) obtidos segundo os métodos propostos por Pizarro (1985) e Cruciani (1989) e pela aplicação da metodologia desenvolvida

Solo	Culturas	Não se considerando o esc. superficial			Considerando-se o esc. superficial	
		Piz.	Cruc.	Metod.	Cruc.	Metod.
1	Milho	25	15	33	21	51
2		50	46	65	47	71
3		36	29	45	31	60
4		45	36	56	39	68
5		32	20	45	26	56
1	Cana-de-Açúcar	25	15	37	21	60
2		50	46	74	47	85
3		36	29	51	31	65
4		45	36	64	39	77
5		32	20	49	26	68
1	Cenoura	38	17	52	29	64
2		58	56	100	56	112
3		45	35	84	37	95
4		55	43	102	45	111
5		51	24	70	34	82

obtidas nas simulações, levando-se em conta o escoamento superficial, porém ainda em valor absoluto, relativamente grandes. Vê-se também, que os espaçaamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia proposta, na condição de ausência de escoamento superficial, foram bem maiores que os obtidos através do método proposto por Cruciani (1989), mesmo quando neste se considerou a presença de escoamento superficial. Desta forma, percebe-se que os métodos tradicionais de dimensionamento tendem excessivamente a favor da segurança, por não considerarem alguns fatores importantes que interferem no rebaixamento do lençol freático, tais como fluxo ascendente oriundo do lençol freático, efeito da evapotranspiração sobre o rebaixamento do lençol freático e, no caso da metodologia de Pizarro (1985), escoamento superficial. Destaca-se que, na metodologia apresentada por Cruciani (1989) se utiliza uma lâmina de chuva de projeto considerada muito alta e, por este motivo, pode ter contribuído consideravelmente para a obtenção de espaçaamentos muito inferiores aos obtidos com o uso da metodologia desenvolvida.

Destaca-se, ainda, que a utilização de espaçaamentos entre drenos menores que os recomendados para a área em questão conduz a uma drenagem em excesso, o que implica em maiores custos (tubos, materiais envoltórios, mão-de-obra, máquinas, etc.) com a implantação do sistema de drenagem; além disso, o sistema de drenagem pode proporcionar profundidades excessivas do lençol freático na estação seca do ano, contribuindo para a redução da quantidade de água na zona radicular e, em conseqüência, para a queda da produtividade.

Vê-se, na Tabela 2, que os espaçaamentos obtidos quando se considerou o escoamento superficial, foram maiores que os obtidos quando não se considerou o efeito do escoamento superficial sobre o espaçamento dos drenos. Desta forma, ressalta-se a importância da consideração deste parâmetro em

projetos de drenagem agrícola, no sentido de minimizar os custos de implantação e manutenção do sistema de drenagem. Destaca-se, também, a importância da determinação adequada da lâmina de água infiltrada no solo, cuja subestimativa implica numa subestimativa do dimensionamento do sistema de drenagem agrícola.

Analisando-se ainda os resultados verifica-se que, em média, os espaçaamentos entre drenos obtidos por meio da metodologia desenvolvida para as culturas do milho, cana-de-açúcar e cenoura, foram de 56, 64 e 87 m, respectivamente; esses resultados revelam que os espaçaamentos fornecidos pela metodologia desenvolvida tendem a se aproximar mais daqueles que vêm sendo utilizados, na prática, na região sudeste brasileira, ou seja, espaçaamentos da ordem de 50 a 100 m, que vêm propiciando resultados satisfatórios em termos de produtividade e rentabilidade para o agricultor.

Ressalta-se, pelos resultados encontrados e pela experiência prática, que os métodos tradicionais de dimensionamento necessitam de aprimoramento, de forma a se adequarem às condições de solo e clima dos trópicos, mais especificamente para regiões de clima úmido e subúmido, as quais abrangem a maior parte do território brasileiro. Esta adequação, no entanto, deve ser realizada principalmente no que tange aos parâmetros de entrada das equações utilizadas e algumas considerações referentes aos efeitos dos elementos meteorológicos sobre o rebaixamento do lençol freático como, por exemplo, da evapotranspiração de referência (ET_0); assim, ressalta-se que a metodologia proposta se aproxima mais dessas realidades e, por isso, tem potencialidade para se tornar uma alternativa promissora para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola nessas regiões.

CONCLUSÕES

1. Os espaçaamentos entre drenos, obtidos com a metodologia proposta, foram maiores que os obtidos segundo métodos tradicionais de dimensionamento.
2. A metodologia proposta tem potencialidade para se tornar uma alternativa promissora para o dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem em regiões tropicais de clima úmido, por apresentar subsídio ao projetista, para realizar uma análise detalhada de todos os fatores que afetam o desempenho do sistema de drenagem.

LITERATURA CITADA

- Allen, R.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 319 p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- Bernardo, S. Manual de Irrigação. 6.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1995. 657p.
- Borges Júnior, J.C.F. Modelo computacional para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola. Viçosa: UFV, 2000. 106p. Dissertação Mestrado
- Bower, H. Developing drainage design criteria. In van Schilfhaarde, J. Drainage for agriculture. Madison: American Society of Agronomy, 1974. p.67-69.

- Carter, C.E.; Camp, C.R. Drain spacing effects on water table control and cane sugar yields. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.37, n.5, p.1509-1513, 1994.
- Cecílio, R.A. Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado. Viçosa, MG: UFV, 2002. 88p. Dissertação Mestrado
- Cruciani, D.E. A drenagem na agricultura. 4.ed. São Paulo: Nobel, 1989. 337p.
- Duarte, S.N. Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos. Viçosa: UFV, 1997. 143p. Tese Doutorado
- Ferreira, P.A. Drenagem de terras agrícolas. In: Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior: ABEAS, Brasília, 2003. 210p.
- Mein, R.G.; Larson, C.L. Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research, Washington, v.9, n.4, p.384-394, 1973.
- Miranda, J.H. Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos. Piracicaba: ESALQ, 1997, 89p. Dissertação Mestrado
- Mualem, Y.A. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resources Research, Washington, v.12, p.512-522. 1976.
- Nicks, A.D.; Lane, L.J.; Gander, G.A. Weather generator: USDA-Water erosion prediction project (WEPP). West Lafayette, In: USDA-ARS - National Soil Erosion Research Laboratory, 1995. Cap. 2, 22p.
- Pizarro, F. Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos. 2-ed. Madrid: Agrícola Española, 1985. 542p.
- Sabbagh, G.J.; Fouss, J.L.; Bergston, R.L. Comparison of EPIC-WT and DRAINMOD simulated performance of land drainage systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.36, n.1, p.73-79, 1993.
- 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, Fort Worth, 1981. 329p.
- van Genuchten, M.T. A closed equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.
- Vildoso, T.A. Relação entre a produção relativa e o índice diário de estresse para a cultura da cenoura (*Daucus carota* L.) Viçosa: UFV 1995. 43p. Dissertação Mestrado
- Workman, S.R.; Skaggs, R.W. Comparison of two drainage simulation models using field data. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.32, n.6, p.1993-1938, 1989.