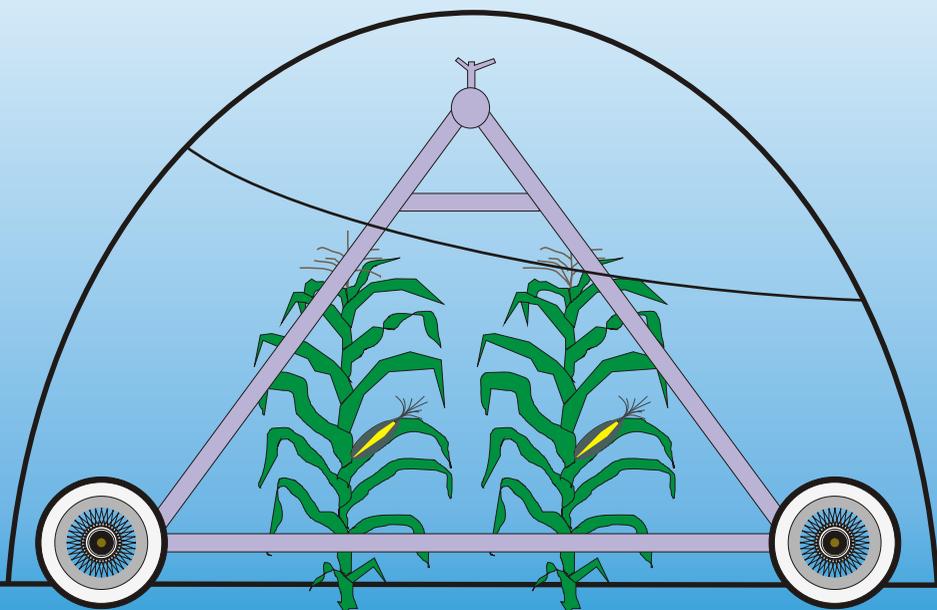


Procedimento para Estimativa da Intensidade de Precipitação Máxima Admissível em Pivô-central com Base nas Características do Equipamento e do Solo





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Cerrados
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1517-5111

Julho, 2003

Documentos 88

Procedimento para Estimativa da Intensidade de Precipitação Máxima Admissível em Pivô-central com Base nas Características do Equipamento e do Solo

Lineu Neiva Rodrigues
Fernando Falco Pruski
Euzébio Medrado da Silva

Planaltina, DF
2003

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Cerrados

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 388-9898

Fax: (61) 388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

sac@cpac.embrapa.br

Comitê de Publicações

Presidente: *Dimas Vital Siqueira Resck*

Editor Técnico: *Carlos Roberto Spehar*

Secretária-Executiva: *Nilda Maria da Cunha Sette*

Supervisão editorial: *Jaime Arbués Carneiro*

Revisão de texto: *Jaime Arbués Carneiro*

Normalização bibliográfica: *Shirley da Luz Soares*

Capa: *Chaile Cherne Soares Evangelista*

Editoração eletrônica: *Jussara Flores de Oliveira*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza /
Jaime Arbués Carneiro*

1ª edição

1ª impressão (2003): tiragem 100 exemplares

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Cerrados.

R696p Rodrigues, Lineu Neiva

Procedimento para estimativa da intensidade de precipitação máxima admissível em pivô-central com base nas características do equipamento e do solo / Lineu Neiva Rodrigues, Fernando Falco Pruski, Euzébio Medrado da Silva. – Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2003.

53 p. – (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 88)

1. Equipamento de irrigação - Pivô-central. 2. Pivô-central - Irrigação. 3. Intensidade de precipitação - Infiltração. I. Pruski, F.F. II. Silva, E.M. III. Título. IV. Série.

631.587 - CDD 21

© Embrapa 2003

Autores

Lineu Neiva Rodrigues

Eng. Agríc., D.Sc., Embrapa Cerrados

lineu@cpac.embrapa.br

Fernando Falco Pruski

Eng. Agríc., D.Sc., Embrapa Cerrados

Universidade Federal de Viçosa

ffpruski@ufv.br

Euzebio Medrado da Silva

Eng. Agrôn., Ph.D., Engenharia de Irrigação

Embrapa Cerrados

euzebio@cpac.embrapa.br

Apresentação

Relatório recente das Nações Unidas projeta que, até o ano de 2025, a produção mundial de alimentos terá que pelo menos dobrar para suprir às novas demandas nutricionais da sociedade e a uma população mundial que aumenta cerca de 80 a 85 milhões de pessoas a cada ano. O cumprimento de tal meta passa fundamentalmente pela agricultura irrigada, onde cada hectare cultivado pode produzir até cinco vezes mais que um não irrigado.

Da área total irrigada no Brasil, em aproximadamente 40% são utilizados sistemas de irrigação por aspersão, sendo que, dentre estes, o pivô-central tem-se destacado. Embora tenha sido patenteado no Estado de Nebraska, EUA, no início dos anos 50, sua fabricação no Brasil teve início apenas no final da década de 70. Atualmente o pivô-central irriga mais de 20% dos três milhões de hectares irrigados no País.

O pivô-central é um equipamento capaz de aplicar água com elevada uniformidade, mas irrigações provenientes de equipamentos mal dimensionados ou mal manejados apresentam, geralmente, grande desuniformidade de aplicação, sendo esta uma das causas de variações de produtividades na área irrigada.

A maior dificuldade quando do dimensionamento de um pivô-central é estimar a intensidade de precipitação máxima que ele pode aplicar ao solo sem provocar escoamento superficial. Convencionalmente, a intensidade de precipitação é

calculada em função de um valor médio da velocidade de infiltração básica do solo não considerando, assim, as variações nas propriedades do solo. Essa prática pode, por sua vez, resultar em áreas com escoamento superficial.

Neste trabalho é apresentado um procedimento para calcular a intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada pelo pivô-central em uma determinada área sem que haja a ocorrência de escoamento superficial.

Roberto Teixeira Alves
Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

Sumário

Introdução	9
Metodologia	13
Infiltração de água no solo	13
Selamento superficial	18
Diâmetro médio das gotas	19
Velocidade real de impacto da gota com a superfície do solo ...	23
Armazenamento superficial	26
Intensidade de precipitação	32
Intensidade de precipitação máxima admissível	33
Avaliação da Metodologia	36
Avaliação I	37
Fator de redução da velocidade de infiltração da água no solo .	37
Intensidade de precipitação máxima admissível	40
Avaliação II	41
Variáveis controláveis	41
Variáveis não-controláveis	44
Exemplo de aplicação	46
Conclusões	48
Referências Bibliográficas	48
Abstract	53

Procedimento para Estimativa da Intensidade de Precipitação Máxima Admissível em Pivô-central com Base nas Características do Equipamento e do Solo

Lineu Neiva Rodrigues

Fernando Falco Pruski

Euzebio Medrado da Silva

Introdução

Nos países em desenvolvimento, o setor agrícola é o principal consumidor de água, com cerca de 70% do total, seguido pelo industrial (21%) e o doméstico (6%) ([ALEXANDRATOS, 1995](#)). Uma vez que a quantidade de água na natureza é finita, para que um dos setores possa aumentar o seu consumo, sem aumentar a demanda total, deverá haver redução no consumo de um ou mesmo dos dois outros setores. Como, em geral, a indústria pode remunerar melhor pelo uso da água, haverá pressão para que os dois outros setores, sobretudo o agrícola, reduzam as suas demandas.

No setor agrícola, a irrigação é a principal consumidora de água. Infelizmente, grande parte dos sistemas de irrigação que operam no Brasil apresenta baixa eficiência na utilização da água, não sendo difícil encontrar sistemas de irrigação operando com eficiências abaixo de 50%.

No Brasil, são irrigados cerca de 2.629.446 hectares, o que corresponde a 4,9% da área total cultivada e a 1,9% da área com potencial para cultivo. Mesmo representando apenas 4,9% da área total plantada, as áreas irrigadas são responsáveis por cerca de 38% da produção nacional de alimentos.

Da área total irrigada no País, em 39,2% são utilizados sistemas de irrigação por aspersão, dentre esses, o pivô-central tem se destacado. Embora tenha sido patenteado no Estado de Nebraska, EUA, no início dos anos 50, sua fabricação

no Brasil teve início apenas no final da década de 70. O período de maior demanda por esse equipamento se deu em 1986, quando foram comercializadas cerca de 731 unidades. De 1988 a 1997, as vendas oscilaram bastante, atingindo um mínimo de 250 unidades em 1990. Em 1998 foram comercializadas cerca de 260 unidades.

Considerando-se que um pivô-central irriga, em média, uma área de 64 hectares, pode-se concluir que a área irrigada por pivô-central representa mais da metade da área total irrigada por aspersão, totalizando mais de 515.000 hectares.

Até o final da década de 80, a tarifa energética era relativamente baixa e a água era tratada como um recurso inesgotável. Nesse período, eram utilizados principalmente pivôs de alta pressão, com canhão na extremidade final da lateral. Com o aumento da tarifa energética, o custo de bombeamento da água tornou-se uma importante parcela do custo de produção, forçando o produtor a procurar alternativas para reduzir esses custos. Estudos realizados pela Companhia Energética de Minas Gerais (Cemig), relatam que somente no Estado de Minas Gerais, os usuários de pivô-central consomem em média 130 GWh anuais, e que, com a adoção de um controle racional da irrigação, poder-se-ia conseguir uma economia de 17,8% na energia utilizada ([COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 1993](#)).

Uma das práticas adotadas a fim de reduzir o consumo de energia por hectare irrigado é a redução da pressão de operação do sistema. [Bernuth & Gilley \(1985\)](#) comentam que 90% dos pivôs centrais instalados nos EUA possuem pressão de operação inferior a 240 kPa, ao contrário do que ocorria em 1975, quando 80% dos equipamentos instalados possuíam pressão acima de 450 kPa. Acredita-se que, no Brasil, a situação não seja muito diferente da existente atualmente nos EUA.

O dimensionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô-central envolve uma complexa interação de processos hidráulicos, ambientais e econômicos. O custo de um pivô por hectare reduz cerca de 64% quando a área irrigada aumenta de 12 para 130 hectares. À medida que o raio da área irrigada aumenta, a intensidade de precipitação na extremidade final da lateral também aumenta, e, como consequência, o risco de ocorrência de escoamento superficial é maior. O escoamento superficial tem como consequências a redução da eficiência de irrigação e o aumento do transporte de partículas de solo, nutrientes, matéria

orgânica, sementes e defensivos agrícolas, causando, além de prejuízos diretos à produção agrícola, a poluição dos cursos d'água.

A maior dificuldade no dimensionamento de um pivô-central é estimar corretamente a intensidade de precipitação máxima que pode ser aplicada ao solo sem que haja a ocorrência do escoamento superficial (intensidade de precipitação máxima admissível). Para evitar a ocorrência do escoamento superficial, a intensidade de precipitação deve ser tal que seu valor em cada instante seja igual ou inferior à soma da velocidade de infiltração da água no solo e da taxa de ocorrência do armazenamento superficial naquele instante. A velocidade de infiltração é afetada diretamente pelas condições da superfície do solo, e essa, por sua vez, varia com o tempo; em sistemas irrigados, o selamento superficial é um dos principais responsáveis por essa variação.

Convencionalmente, a intensidade de precipitação é calculada em função de um valor médio da velocidade de infiltração básica. Uma vez que as propriedades do solo variam ao longo da área irrigada, essa prática pode resultar em áreas com escoamento superficial. Além disso, a variação do diâmetro de gota produzida pelo emissor, ao longo do raio do pivô e ao longo da circunferência percorrida pelo emissor, combinada com a variação das propriedades físicas do solo induz a formação de diferentes níveis de selamento superficial ao longo da área irrigada, o que implica em áreas com maior ou menor tendência à ocorrência de escoamento superficial. Uma outra consequência da variabilidade espacial das propriedades físicas do solo é a variação da rugosidade randômica provocada pela ação dos implementos agrícolas ao longo da área irrigada, o que implica, também, em áreas mais ou menos sujeitas à ocorrência de escoamento superficial.

Tendo em vista a importância que representam os sistemas de irrigação por pivô-central para a agricultura irrigada, foram desenvolvidas diversas metodologias, visando a propiciar a utilização desse sistema de forma adequada, podendo-se citar as propostas por [Allen \(1990\)](#) e [Mohamoud et al. \(1992\)](#). Entretanto, tais metodologias apresentam algumas limitações, tais como a não consideração da variabilidade do solo dentro da área irrigada. Isto, entre outras coisas, tem limitado ou mesmo impossibilitado a utilização dessas metodologias em algumas situações, como, por exemplo, na agricultura de precisão.

Até então, mesmo reconhecendo que os recursos são variáveis dentro da área irrigada, o manejo e o dimensionamento de sistemas de irrigação têm sido

praticados considerando a área irrigada como uma unidade homogênea. Isto é, usualmente a água, os nutrientes e os defensivos são aplicados de maneira uniforme dentro da área irrigada, sendo a quantidade a ser aplicada calculada com base na média ou na condição mais limitante para a cultura. Conseqüentemente, dentro da área irrigada, alguns pontos recebem a aplicação ótima e outros recebem aplicações menores ou maiores que a ótima. Tal procedimento tem contribuído para a baixa eficiência de irrigação hoje observada nos sistemas agrícolas.

A aplicação de água a uma taxa variada (irrigação de precisão) está apenas começando a ser explorada. Sistemas de irrigação autopropelidos como o pivô-central e o linear móvel são particularmente adequados para a condição de irrigação de precisão devido, principalmente, aos seus atuais níveis de automação e grande área irrigada com uma única linha lateral. Utilizando-se controles, sensores e ferramentas de tomada de decisão apropriados, esses sistemas de irrigação podem ser manejados de forma a aplicar, dentro da área irrigada, os diferentes requerimentos por água, defensivos e nutrientes ([EVANS, 1997](#)).

À medida que os computadores passaram a ser utilizados para controlar a aplicação de água sob pivôs e com os avanços técnicos nos sistemas de posicionamento global, pivôs que aplicam água de forma diferenciada ao longo da área estão se tornando cada vez mais comuns. Sendo assim, conhecendo-se a intensidade de precipitação máxima admissível (função das propriedades físicas e das práticas de manejo do solo) em posições específicas ao longo da área irrigada pode-se programar o pivô de tal modo que a intensidade de precipitação (função da lâmina a ser aplicada) nas posições pré-determinadas seja no máximo igual à intensidade máxima admissível.

Em irrigação de precisão, em particular, o conhecimento da intensidade de aplicação máxima que pode ser aplicada em pontos específicos da área irrigada sem que haja escoamento superficial é de grande importância. Essa informação pode ser utilizada como um indicativo de como a taxa de aplicação de água dentro da área irrigada pode ser variada.

Sendo assim, o principal objetivo do presente trabalho foi descrever um procedimento, função das características do equipamento e do solo, para estimativa da intensidade de precipitação da máxima admissível.

Metodologia

A ocorrência do escoamento superficial é função das características físicas do solo, das práticas de manejo adotadas e do perfil de aplicação de água do emissor. Uma vez que esses elementos, dentro de uma mesma área, são variáveis, uma metodologia que seja adequada à estimativa da intensidade de precipitação máxima deve levar em consideração a variabilidade espacial das propriedades físicas do solo, a variação das práticas de manejo do solo, a variabilidade na capacidade de infiltração induzida pelo impacto da gota com a superfície do solo e a variação na lâmina de água aplicada.

O procedimento para estimativa da intensidade de precipitação máxima admissível que é apresentado na seqüência baseia-se no trabalho desenvolvido por [Rodrigues et al. \(1999\)](#).

Infiltração de água no solo

Caracterizar as variáveis que influenciam a infiltração é um processo demorado e difícil. A intensidade em que algumas variáveis afetam o processo de infiltração, ainda hoje, não é bem definida; sendo assim, diversas equações têm sido propostas, visando a simplificar o estudo da infiltração da água no solo.

Em geral, as equações utilizadas para a estimativa da infiltração da água no solo podem ser classificadas como empíricas ou baseadas na representação física do processo de infiltração ([SKAGGS et al., 1969](#); [RAWLS et al., 1996](#)). As equações empíricas apresentam parâmetros que devem ser obtidos a partir do ajuste aos dados de campo, o que constitui em uma limitação à aplicação dessas equações; já as equações ditas físicas são fundamentadas em uma análise teórica ou conceitual do processo.

Áreas submetidas à irrigação estão sujeitas, normalmente, a diversas práticas de preparo de solo que podem afetar a variabilidade espacial e temporal da infiltração da água no solo. Dessa forma, uma equação que descreva o processo de infiltração da água no solo em uma área irrigada por pivô-central deve ser capaz de representar os efeitos advindos das práticas de preparo do solo na infiltração ([MOHAMOUD et al., 1992](#)).

Entre as várias equações disponíveis para estimar a infiltração da água no solo, a proposta por Green-Ampt (GA) é uma das que apresenta maior potencial de

utilização, devido sua simplicidade e por estar fundamentada no próprio processo físico da infiltração, o que não ocorre com as equações empíricas [\(RODRIGUES & PRUSKI, 1997\)](#).

[Green & Ampt \(1911\)](#) desenvolveram uma equação, baseada na lei de Poiseuille, para calcular a velocidade de infiltração da água no solo. A equação original foi derivada para um solo homogêneo e profundo, com umidade inicial constante ao longo de todo o perfil, e submetido a uma lâmina de água constante na superfície do solo. Foi assumido que a água ao penetrar no solo, forma duas regiões bem definidas, sendo a primeira completamente saturada e a segunda mantida com o conteúdo de umidade inicial (Figura 1).

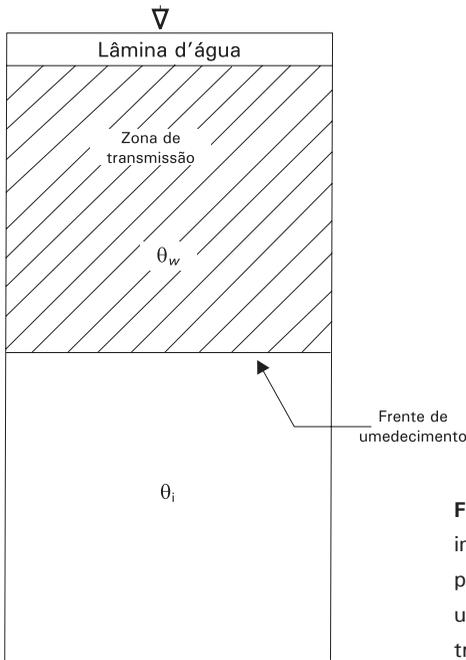


Figura 1. Esquema representativo da infiltração conforme pressuposições feitas por Green & Ampt, destacando-se as umidades do solo referentes a zona de transmissão (θ_w) e ao momento inicial (θ_i).

No desenvolvimento da equação de GA, considerou-se a existência de uma lâmina de água na superfície do solo (condição de empoçamento); nessa condição a velocidade de infiltração é considerada igual à capacidade de infiltração durante todo o tempo. No entanto, em sistemas de irrigação pressurizados, quando se inicia a irrigação, tal condição não é necessariamente verdadeira.

[Mein & Larson \(1973\)](#) modificaram a equação de GA, para permitir sua aplicação em condições anteriores ao empoçamento. Para isso, eles consideraram uma intensidade de precipitação constante. A equação de Green-Ampt modificada por [Mein & Larson \(1973\)](#) (GAML) pode ser entendida como sendo um modelo de dois estágios, que consiste em primeiro determinar o tempo de empoçamento e depois estimar a velocidade de infiltração.

[Chu \(1978\)](#) e [Smith & Parlange \(1978\)](#) mostraram que o modelo de GAML, originalmente derivado para condições de precipitação constante, pode ser aplicado para condições de precipitação variável e intermitente. Nesse caso, a intensidade de precipitação passa a ser função do tempo, podendo, nesse caso, a equação de GA ser descrita da seguinte forma:

$$VI(t) = K_s \left[1 + \frac{S_w (\theta_s - \theta_i)}{I(t)} \right] \quad (1)$$

em que

- VI(t) = velocidade de infiltração da água no solo, mm h⁻¹;
- K_s = condutividade hidráulica do solo saturado, mm h⁻¹;
- S_w = potencial matricial médio na frente de umedecimento, mm;
- θ_s = umidade do solo na saturação, cm³ cm⁻³;
- θ_i = umidade inicial do solo, cm³ cm⁻³; e
- I(t) = infiltração acumulada até o tempo t, mm.

Originalmente, a equação de GA foi derivada considerando que a região acima da frente de umedecimento encontrava-se saturada. Entretanto, diversos pesquisadores ([ONSTAD et al., 1973](#); [SLACK, 1980](#); [ZIRBEL et al., 1982](#)) constataram que no campo a umidade de saturação não é atingida e sugerem utilizar valores menores para a umidade da zona de transmissão (θ_w) e, também, para a condutividade hidráulica dessa região (K_w). Os valores encontrados por aqueles autores para θ_w variaram, em função do tipo de solo, de 0,79 a 0,90 θ_s, sendo o valor de 0,90 utilizado neste trabalho, seguindo a recomendação feita por Slack (1980). Já para a K_w é utilizado o valor sugerido por [Bower \(1969\)](#), ou seja, 0,5 K_s.

Para utilizar as equações de GA ou GAML, os valores de K_s, θ_i, θ_s e S_w devem

ser previamente conhecidos. Embora se recomende que essas variáveis sejam medidas na própria área onde será conduzida a irrigação, muitas vezes isto não é possível, tornando-se necessário utilizar metodologias específicas para estimá-las.

A condutividade hidráulica do solo saturado pode ser, por exemplo, estimada por meio da equação proposta por [Brutsaert \(1967\)](#)

$$K_s = 270 \frac{\theta_e^2}{S_e} \frac{b^2}{(b+1)(b+2)} \quad (2)$$

sendo

$$\theta_e = \theta_s - \theta_r \quad (3)$$

em que

θ_e = porosidade efetiva, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$;

S_e = potencial matricial no ponto de umidade de entrada de ar no solo, cm;

b = coeficiente angular da curva de retenção de água no solo plotada em papel log-log, cm; e

θ_r = umidade residual do solo, $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

Dos quatro parâmetros de entrada da equação de GA, o potencial matricial médio na frente de umedecimento é o de mais difícil determinação. No campo, a dificuldade é ainda maior, uma vez que, em virtude da desuniformidade da umidade do solo no início do processo de infiltração e das propriedades físicas do solo ao longo do seu perfil, a formação da frente de umedecimento não é abrupta, como pressuposto no desenvolvimento da equação. Em razão dessa dificuldade e da importância da correta estimativa desse parâmetro para o cálculo da infiltração, são apresentadas três opções para sua estimativa. A metodologia a ser utilizada dependerá dos parâmetros de solo disponíveis.

Opção a – o potencial matricial médio na frente de umedecimento é calculado em função das propriedades do solo. Segundo [Rawls et al. \(1996\)](#), S_w pode ser calculado pela equação.

$$S_w = e^{(\xi_1 + \xi_2 + \xi_3)} \quad (4)$$

em que

$$\xi_1 = 6,53 - 7,326 \phi + 0,00158 S_a^2 + 3,809 \phi^2 + 0,0003444 S_{ar} S_a \quad (5)$$

$$\xi_2 = -0,04989 S_{ar} \phi + 0,0016 S_{ar}^2 \phi^2 + 0,0016 S_a^2 \phi^2 \quad (6)$$

$$\xi_3 = -0,0000136 S_{ar}^2 S_a - 0,00348 S_a^2 \phi - 0,000799 S_{ar}^2 \phi \quad (7)$$

em que

ϕ = porosidade do solo, %;

S_a = percentagem de argila, %; e

S_{ar} = percentagem de areia, %.

Opção b – o potencial matricial médio na frente de umedecimento é calculado em função da condutividade hidráulica do solo saturado. Segundo Mullem, citado por [Rawls et al. \(1996\)](#), S_w pode ser calculado pela equação

$$S_w = 4,903 (K_s + 0,02)^{-0,4932} \quad (8)$$

Opção c – o potencial matricial médio na frente de umedecimento é calculado em função das características físico-hídricas do meio. Segundo Moore, citado por [Slack \(1980\)](#), S_w pode ser calculado pela equação

$$S_w = \frac{S_e \left[\left(\frac{K_w}{K_s} \right)^{\frac{(b+3)}{(2b+3)}} - \left(\frac{K(\theta_i)}{K_s} \right)^{\frac{(b+3)}{(2b+3)}} \right]}{\frac{(b+3)}{(2b+3)} \left(\frac{K_w}{K_s} - \frac{K(\theta_i)}{K_s} \right)} \quad (9)$$

sendo

$$K(\theta_i) = K_s \left(\frac{\theta_i}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (10)$$

em que $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica do solo não-saturado, mm h^{-1} .

Selamento superficial

Em sistemas agrícolas irrigados por aspersão, deve-se também considerar o efeito do selamento superficial na infiltração, sendo esse caracterizado como a presença de uma camada de solo compacta situada à superfície do solo, com espessura variando entre 3 e 6 mm, a qual é menos permeável à passagem de água que as camadas abaixo dela ([HACHUM & ALFARO, 1980](#)). Ainda não há consenso a respeito da faixa de variação da espessura dessa camada, a qual depende de diversos fatores. [Tackett & Pearson \(1965\)](#) comentam que a espessura dessa camada varia de 1 a 5 mm; já [Sor & Bertrand \(1962\)](#) mostraram que ela varia de 1 a 30 mm.

[Ben-Hur et al. \(1989\)](#) comentaram que as altas taxas de escoamento superficial observadas em áreas irrigadas com sistemas de irrigação por aspersão são devidas principalmente à formação do selamento superficial.

O aumento do preço das tarifas energéticas, associado ao baixo preço dos produtos agrícolas, tem forçado a implantação de sistemas de baixa pressão. A forma mais simples de reduzir os gastos com energia é substituir os aspersores de alta pressão por aspersores de baixa pressão ou por difusores. Entretanto, aspersores de baixa pressão produzem gotas com maior diâmetro, que favorecem o aparecimento da camada de selamento superficial. Segundo [McIntyre \(1958\)](#), essa camada é formada pelo impacto das gotas com a superfície do solo e pela movimentação das partículas finas do solo, com posterior acomodação e obstrução dos poros.

É comum, no dimensionamento de um sistema de irrigação do tipo pivô-central, o projetista não considerar a redução da velocidade de infiltração provocada pelo surgimento do selamento superficial. Nesse caso, passado algum tempo, a capacidade de infiltração da água no solo torna-se menor que a intensidade de precipitação e poderá haver a ocorrência do escoamento superficial.

Visando a incorporar o efeito da camada de selamento superficial na VI, [Bernuth \(1985\)](#) sugere utilizar, na equação 1, K_h em vez de K_w , sendo K_h calculado pela equação.

$$K_h = K_w \left(1 - \frac{F_r}{100} \right) \quad (11)$$

em que F_r é o fator de redução da condutividade hidráulica do solo saturado, %.

[Bernuth & Gilley \(1985\)](#), citando diversos trabalhos, concluíram que a porcentagem de redução da infiltração da água no solo é dependente do diâmetro das gotas, da velocidade de impacto das gotas com a superfície do solo e das características do solo. Esses mesmos autores ajustaram uma equação aos valores de velocidade de infiltração da água no solo obtidos por vários pesquisadores, sob diversas condições de solo e diâmetros de gotas, e utilizaram essa equação para calcular um fator redutor para a velocidade de infiltração. A equação obtida foi

$$F_r = 3,541 D_{g50}^{0,683} V_g^{1,271} S_{ar}^{-0,353} S_s^{0,257} \quad (12)$$

em que

D_{g50} = diâmetro médio das gotas, mm;

V_g = velocidade de impacto das gotas com a superfície do solo, m s⁻¹;

S_s = porcentagem de silte, %.

Analisando a equação 12, nota-se que, quanto maiores o diâmetro médio das gotas, a velocidade de impacto da gota e a porcentagem de silte no solo, tanto maior é o fator de redução da velocidade de infiltração. Por sua vez, quanto maior a porcentagem de areia no solo, tanto menor é esse fator.

Os autores justificam a não-inclusão na equação 12 do tempo de duração da precipitação em virtude da rápida formação do selamento superficial, dois a três minutos, segundo [Ellison \(1944\)](#).

Diâmetro médio das gotas

Para determinar o fator de redução da velocidade de infiltração da água no solo, é necessário, primeiramente, determinar o diâmetro médio das gotas produzidas por cada aspersor. Infelizmente os catálogos apresentados pelos fabricantes normalmente não informam a respeito desse parâmetro.

A redução na pressão de operação do pivô afeta, além do custo de bombeamento, outros componentes do sistema. Conforme [Bernuth \(1985\)](#), a redução na pressão de operação do sistema pode provocar um ou mais dos seguintes efeitos negativos: 1) redução do diâmetro de alcance do aspersor, o que implica aumento da intensidade de precipitação, com redução no tempo de aplicação; 2) aumento do diâmetro das gotas, devido à redução na pressão e, ou, ao aumento do diâmetro do bocal do aspersor; 3) redução na uniformidade

de aplicação, devido a mudanças na pressão de operação do aspersor, provocadas pelas ondulações do terreno; e 4) aumento do custo inicial do equipamento.

Segundo Finkel, citado por [Oliveira \(1991\)](#), a combinação de pressão e diâmetro do bocal determina o diâmetro das gotas e sua distribuição sobre a área molhada. Fixando-se o diâmetro do bocal, um aumento da pressão provoca acréscimo da velocidade do jato e maior velocidade relativa entre a água e o ar, resultando em número maior de gotas pequenas. Ademais, fixando-se a pressão, um aumento do diâmetro do bocal reduz a velocidade, ocasionando gotas maiores. Na ausência de vento, as gotas grandes caem mais distantes, enquanto as gotas pequenas, possuindo maior área específica, sofrem maior resistência do ar e, por isso, caem próximo do aspersor.

O diâmetro das gotas produzidas pelos aspersores exerce grande influência na eficiência dos sistemas de irrigação do tipo pivô-central; por exemplo: gotas menores estão associadas a maiores perdas por deriva, e gotas maiores, à maior probabilidade de ocorrência de escoamento superficial.

Segundo [Eigel & Moore \(1983\)](#), os diâmetros das gotas de chuva têm sido estimados por vários pesquisadores, desde meados de 1980, com a utilização dos seguintes métodos: método da mancha, método da farinha, método da imersão das gotas em óleo, método fotográfico e método do "momentum". Recentemente, [Kincaid \(1996\)](#) utilizou o método *a laser* para estimar o diâmetro das gotas de aspersores utilizados em irrigação; entretanto, o preço desse equipamento ainda é elevado.

Em virtude da dificuldade de aplicar tais métodos, [Fukui et al. \(1980\)](#) e [Bernuth & Gilley \(1984\)](#) desenvolveram modelos para estimativa da distribuição do diâmetro das gotas, utilizando a curva de distribuição da precipitação do aspersor e aplicando a teoria balística ao movimento da gota no ar.

Na literatura existem diversas metodologias para estimativa do diâmetro médio das gotas produzidas pelos emissores. Duas delas são apresentadas neste trabalho. A primeira, denominada caso a, utiliza a função de densidade de probabilidade log-normal a três parâmetros, sendo os parâmetros da distribuição calculados pelas equações propostas por [Bernuth \(1985\)](#); a segunda, denominada caso b, utiliza a equação proposta por [Kincaid \(1996\)](#).

Caso a – nessa opção, utiliza-se a função de densidade de probabilidade log-normal a três parâmetros (ULLN), sendo os parâmetros da distribuição calculados pelas equações propostas por [Bernuth \(1985\)](#). Segundo [Bezdek & Solomon \(1983\)](#), essa distribuição pode ser representada pela equação.

$$f(D_{g50}) = \frac{\alpha e}{\sigma D_{g50} (\alpha - D_{g50}) (2\pi)^{0,5}} \left[\frac{\log\left(\frac{D_{g50}}{\alpha - D_{g50}}\right) - \mu}{\sigma} \right]^2 \quad (13)$$

em que

α = parâmetro da função de densidade de probabilidade log-normal a três parâmetros (diâmetro máximo de gota), mm;

σ = parâmetro da função de densidade de probabilidade log-normal a três parâmetros (desvio-padrão), mm; e

μ = parâmetro da função de densidade de probabilidade log-normal a três parâmetros (média), mm.

Segundo [Bernuth \(1985\)](#), os parâmetros da distribuição de probabilidade log-normal a três parâmetros podem ser calculados em função do modelo do emissor utilizado, do diâmetro do bocal e da pressão de operação, para isto sugerem utilizar as equações 14, 15 e 16 para aspersores de impacto com bocais circulares, e as equações 14, 15, 16 e 17 para aspersores do tipo difusor. Os valores dos coeficientes a, b e c são apresentados na [Tabela 1](#).

$$\alpha = a P_i^b D_{bi}^c \quad (14)$$

$$\mu = \ln(a P_i^b D_{bi}^c) \quad (15)$$

$$\sigma = a P_i^b D_{bi}^c \quad (16)$$

$$D_{bi} = 0,8273 Nr^{0,5} \quad (17)$$

em que

P_i = pressão de operação do aspersor i, kPa;

D_{bi} = diâmetro de bocal do aspersor i, mm; e

Nr = número de ranhuras na placa do difusor.

Tabela 1. Valores dos coeficientes das equações utilizadas no cálculo dos parâmetros da distribuição de probabilidade log-normal a três parâmetros.

	Aspersor de impacto			Aspersor tipo difusor		
	a	b	c	A	b	c
α	29,9606	-0,39	0,37	1,729	-0,30	0,87
μ	0,000799	0,49	0,57	0,5579	0,02	0,59
σ	0,3206	0,13	0,034	0,7612	0,02	0,05

Fonte: Bernuth (1985).

A probabilidade de se obter uma gota com determinado diâmetro, sendo conhecidos o diâmetro máximo da gota, o desvio-padrão e a média das gotas, é dada pela integral da equação 13. No presente caso, entretanto, conhece-se a probabilidade desejada (50%) e deseja-se conhecer o diâmetro de gota que corresponde a essa dada probabilidade. Uma vez que a integral da equação 13 não é explícita em D_g , tem-se que adotar técnicas iterativas para obtenção do valor desse parâmetro. A integral é resolvida numericamente, como, por exemplo, pela técnica da quadratura de Gauss.

Caso b – recentemente, [Kincaid \(1996\)](#) utilizou instrumentos a *laser* para analisar a distribuição do diâmetro de gotas de aspersores utilizados na irrigação. A partir desse trabalho, esse autor concluiu que, em aspersores de impacto, a distribuição das gotas é mais influenciada pela pressão no aspersor do que pelo diâmetro do bocal; o contrário é observado em aspersores do tipo difusor. Com base nessa constatação, eles sugerem utilizar a razão entre o diâmetro do bocal e a pressão de operação do aspersor para descrever a distribuição de gotas dos principais aspersores utilizados na irrigação.

Para calcular o diâmetro médio das gotas, esse mesmo autor sugeriu a equação

$$D_{g50} = a_d + b_d \left(\frac{D_{bi}}{P_i} \right) \quad (18)$$

em que a_d e b_d são coeficientes de ajuste da equação do diâmetro médio das gotas.

Na Tabela 2 apresentam-se os valores, em função do tipo do emissor utilizado, dos coeficientes a_d e b_d .

Velocidade real de impacto da gota com a superfície do solo

Para utilizar a equação 12, é necessário conhecer a velocidade real de impacto da gota com a superfície do solo.

O jato de água emitido por um emissor fraciona-se em gotas de diferentes diâmetros, que podem ser tratadas, individualmente, como projéteis (Figura 2). O processo de fracionamento do jato de água em gotas não é bem determinado; entretanto, sabe-se que é função do número de Reynolds ([Bernuth & Gilley, 1984](#)).

Tabela 2. Valores dos coeficientes da equação para cálculo do diâmetro médio das gotas.

Modelo do aspersor	a_d	b_d
Impacto, com diâmetro de bocal variando de 3 a 6 mm	0,31	11.900
Impacto, com diâmetro de bocal variando de 9 a 15 mm	1,30	2.400
Difusor	0,82	620

Fonte: Kincaid (1996).

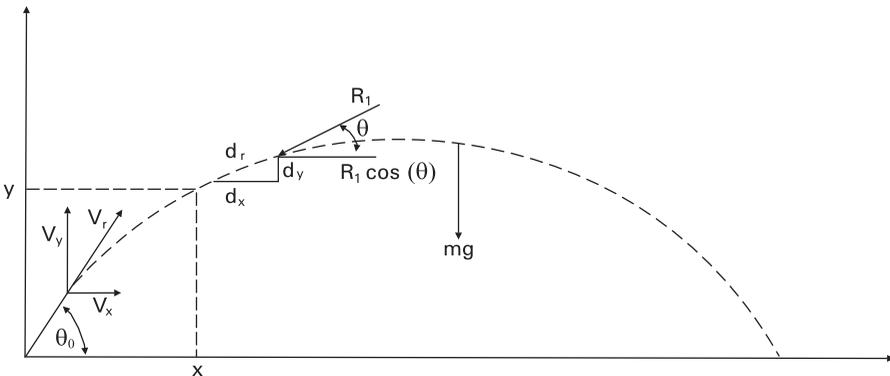


Figura 2. Esquema representativo, segundo [Bernuth & Gilley \(1984\)](#), da trajetória de uma gota, bem como das forças que atuam sobre ela.

Assumindo que o jato de água emitido por um emissor fraciona-se em gotas imediatamente ao sair do bocal do emissor, pode-se estimar, com base nos princípios fundamentais da dinâmica, a velocidade de impacto da gota com a

superfície do solo. As equações diferenciais que caracterizam a trajetória de uma gota podem ser representadas, segundo [Bernuth & Gilley \(1984\)](#), pelas equações

$$m \frac{d^2x}{dt_g^2} = -\tau \cos \theta \quad (19)$$

$$m \frac{d^2y}{dt_g^2} = m g - \tau \sin \theta \quad (20)$$

em que

M = massa da gota de água, kg;

X = posição da gota em relação ao eixo x , a partir do aspersor, m;

t_g = tempo de deslocamento da gota, s;

τ = resistência do ar ao deslocamento da gota, N;

θ = ângulo de trajetória da gota com a horizontal, radianos; e

Y = posição da gota em relação ao eixo y , a partir do aspersor, m.

Segundo [Seginer \(1980\)](#), a resistência do ar ao deslocamento da gota pode ser calculada pela equação

$$\tau = C_2 V_r^2 \quad (21)$$

em que

C_2 = coeficiente de resistência do ar ou coeficiente de arrastamento, adimensional; e

V_r = velocidade real de queda da gota, m s⁻¹.

A velocidade real de queda da gota é calculada pela equação

$$V_r = (V_x^2 + V_y^2)^{0,5} \quad (22)$$

em que

V_x = componente da velocidade da gota em relação ao solo na direção x , m s⁻¹; e

V_y = componente da velocidade da gota em relação ao solo na direção y , m s⁻¹.

Para resolver as equações diferenciais apresentadas, é necessário conhecer a variação do coeficiente de arraste em função do diâmetro médio das gotas. [Bernuth & Gilley \(1984\)](#), baseando-se em dados apresentados por Laws, List e Green, apresentaram, em forma de gráfico, os valores de C_2 em função do diâmetro das gotas. Visando a incorporar esse gráfico no modelo, foram geradas equações para representá-lo. Para isto, os pontos do gráfico foram capturados. Para se obter uma equação que melhor representasse o gráfico, esse foi dividido em três regiões. A primeira região corresponde aos dados apresentados por List; a segunda, aos dados de Green; e a terceira, aos dados de Laws. A equação resultante do ajuste é da forma

$$C_2 = a_{c2} + \frac{b_{c2}}{D_{g50}^2} \quad (23)$$

em que a_{c2} e b_{c2} são os coeficientes da equação de arraste, adimensionais.

Na Tabela 3 apresentam-se os valores dos coeficientes da equação 23, do coeficiente de determinação e da faixa de validade.

Tabela 3. Coeficientes utilizados pelo modelo na estimativa do coeficiente de arraste, com os respectivos valores do coeficiente de determinação e da faixa de validade.

Faixa de validade dos coeficientes (mm)	Coeficientes		r^2 (%)
	a_{c2}	b_{c2}	
$0,45 \leq D_{g50} < 1,0$	-0,040230370	0,611629901	99
$1,0 \leq D_{g50} < 1,5$	0,134521143	0,468624706	99
$1,5 \leq D_{g50} \leq 6$	0,086043606	0,579112842	99

Para $D_{g50} < 0,45$ mm, adota-se $C_2 = 0,3$; e para $D_{g50} > 6$ mm, adota-se $C_2 = 0,105$.

O mercado oferece equipamentos de irrigação do tipo pivô-central de diversas alturas e, além disso, eles podem trabalhar sob as mais diversas pressões. Por causa disso, em alguns casos, a velocidade de queda da gota pode atingir a velocidade terminal. Assim, foi necessário desenvolver um procedimento para calcular, em função do diâmetro médio, a velocidade máxima que a gota com D_{g50} pode alcançar (V_{max}). Para isto, ajustou-se uma equação aos dados de V_{max}

em função do D_g apresentados por [Keller & Bliesner \(1990\)](#). A equação obtida do ajuste foi

$$V_{\max} = -0,6133 + 5,3844 D_{g50} - 1,0772 D_{g50}^2 + 0,0779 D_{g50}^3 \quad (24)$$

em que V_{\max} é a velocidade máxima que a gota com D_{g50} pode atingir, $m s^{-1}$.

Se $0,5 \text{ mm} \leq D_{g50} \leq 5,0 \text{ mm}$, V_{\max} é calculado pela equação 24; se $D_{g50} < 0,5 \text{ mm}$, V_{\max} é a velocidade real de queda da gota calculada pelas equações 19 e 20; e se $D_g > 5,0 \text{ mm}$, adota-se $V_{\max} = 9,30 \text{ m s}^{-1}$.

As equações diferenciais 19 e 20 são resolvidas utilizando-se a técnica numérica, como por exemplo, Runge-Kutta de quarta ordem. Para isto as seguintes condições iniciais podem ser utilizadas: $x_0 = 0$; $y_0 =$ altura do bocal do aspersor; $V_{x0} = V_{r0} \cos(\theta_0)$; e $V_{y0} = V_{r0} \sin(\theta_0)$, sendo o tempo incrementado de 0,005 segundo, conforme recomendação de Li & Kawano (1992).

A velocidade inicial da gota é calculada pela equação

$$V_0 = C_{d1} \left(\frac{2 g P_i}{\gamma} \right)^{0,5} \quad (25)$$

em que V_0 é a velocidade inicial da gota, $m s^{-1}$.

Armazenamento superficial

A ação de implementos agrícolas no preparo do solo causa perturbações aleatórias em sua superfície, denominadas rugosidade randômica. Segundo [Potter \(1990\)](#), a rugosidade da superfície do solo é uma propriedade dinâmica, a qual interfere em muitos dos processos que ocorrem na superfície; dentre esses, destacam-se a infiltração da água no solo, o armazenamento e o escoamento superficial. Entretanto, o preparo do solo e as condições climáticas podem modificar rapidamente essa propriedade, embora a taxas diferentes, conforme o tipo de solo.

A rugosidade da superfície do solo, incluindo a provocada pela ação dos implementos agrícolas, determina o volume de água que pode ser mantido sobre a superfície do solo, como armazenamento superficial. Esse componente

influencia diretamente a taxa de ocorrência de escoamento superficial e, em consequência, o processo erosivo ([Morgan et al., 1998](#)).

[Alberts et al. \(1995\)](#) apresentaram equação, em função da rugosidade randômica antes do preparo do solo, da rugosidade criada pelo implemento e da porcentagem da superfície do solo alterada pela ação do implemento agrícola, para calcular a rugosidade randômica imediatamente depois do preparo do solo. Esses mesmos autores apresentaram tabela com valores indicativos desses parâmetros em função do implemento utilizado no preparo do solo. [Morgan et al. \(1998\)](#) e [Renard et al. \(1997\)](#) também apresentaram valores da rugosidade randômica em função do implemento agrícola utilizado no preparo do solo.

Até o momento não existe uma técnica que seja rápida de ser executada e ao mesmo tempo efetiva para estimar a rugosidade randômica ([Renard et al., 1997](#)). Em virtude disso, esses autores apresentaram fotografias de áreas com diversos valores de rugosidade randômica, que podem ser utilizadas para uma estimativa visual desse parâmetro.

O armazenamento superficial é muito variável; [Gayle & Skaggs \(1978\)](#) pesquisaram três solos agrícolas sujeitos a diferentes práticas de preparo de solo e obtiveram valores médios de lâmina armazenada variando entre 0,6 e 7,5 mm. Em virtude disso, [Mohamoud et al. \(1992\)](#), trabalhando a favor da segurança, recomendam não utilizar esse parâmetro na fase de dimensionamento. No entanto, a consideração do armazenamento superficial permite a escolha de sistemas com pressão de operação menor, o que pode reduzir o custo inicial do sistema.

Segundo [Stone et al. \(1996\)](#), a determinação da variação do armazenamento superficial é difícil de ser realizada em campo; em razão disso, sugerem a utilização da rugosidade randômica para estimá-lo.

Com o objetivo de contabilizar a influência do armazenamento superficial no cálculo da intensidade de precipitação máxima, sem comprometer a segurança, utiliza-se nessa metodologia o menor valor que esse parâmetro poderá assumir até um dado período.

[Osntad \(1984\)](#) desenvolveu uma equação, a partir da análise de 1.000 experimentos, para calcular o armazenamento superficial máximo. A equação

apresentada é função da declividade do terreno e da rugosidade randômica, podendo ser calculada equação.

$$A_s = 0,112RR + 3,1RR^2 - 1,2RR J_0 \quad (26)$$

em que

A_s = armazenamento superficial máximo, m;

RR = rugosidade randômica, m; e

J_0 = declividade da superfície do solo, $m \cdot m^{-1}$.

Segundo [Alberts et al. \(1995\)](#), a rugosidade randômica pode ser calculada pela equação

$$RR_i = RR_0 \frac{T_{ds}}{100} + RR_{t-1} \left(1 - \frac{T_{ds}}{100} \right) \quad (27)$$

em que

RR_i = rugosidade randômica imediatamente depois do preparo do solo, m;

RR_0 = rugosidade randômica provocada pela ação do implemento de preparo do solo, m;

T_{ds} = porcentagem da superfície do solo alterada pela ação do implemento de preparo do solo, %; e

RR_{t-1} = rugosidade randômica da superfície do solo no dia anterior ao preparo do solo, m.

Em virtude da dificuldade que se tem em determinar em campo os valores da RR_0 , da T_{ds} e da RR_{t-1} , apresenta-se duas alternativas para estimativa desses parâmetros: a) com base no banco de dados apresentado por [Alberts et al. \(1995\)](#), [Tabela 4](#); e b) com base no banco de dados visual apresentado por [Renard et al. \(1997\)](#), [Figura 3](#). Nesse caso assumi-se que a porcentagem da superfície do solo alterada pela ação do implemento de preparo do solo seja igual a 100%.

O decaimento da rugosidade randômica em função da lâmina precipitada pode ser calculado pela equação ([Potter, 1990](#))

$$RR_t = RR_i e^{-0,3 \left(\frac{L_a}{b_{rr}} \right)^{0,6}} \quad (28)$$

$$b_{rr} = 63 + 62,7 \ln(0,5 S_{mor}) + 15,7 S_a - 0,25 S_a^2 \quad (29)$$

em que

L_a = lâmina aplicada desde o preparo do solo, m;

S_{mor} = porcentagem de matéria orgânica, %.

Tabela 4. Valores de rugosidade randômica provocada pela ação do implemento de preparo do solo (RR_o) e da porcentagem da superfície do solo alterada pela ação do implemento de preparo do solo (T_{ds}).

Implemento agrícola utilizado no preparo do solo	RR_o (m)	T_{ds} (%)
Aplicador de amônia	0,013	13
Arado de aivecas de 8 polegadas	0,043	100
Arado de cinzel	0,023	10
Combinação de arado de cinzel e subsolador	0,015	100
Cultivador mecânico para preparo de solo primário com enxada tipo bico de pato	0,015	100
Cultivador mecânico para preparo de solo primário com enxadas espaçadas de 12 a 20 polegadas	0,015	100
Cultivador mecânico para preparo de solo primário com profundidade de trabalho de 15 a 30 cm	0,015	100
Cultivador mecânico para preparo de solo secundário com enxadas espaçadas de 30 a 50 cm	0,015	100
Cultivador mecânico para preparo de solo secundário com enxadas tipo bico de pato	0,015	100
Distribuidor de esterco subsuperficial	0,013	100
Enxada rotativa	0,012	100
Enxada rotativa para preparo de solo primário com profundidade de trabalho de 15 cm	0,015	100
Enxada rotativa para preparo de solo secundário com profundidade de trabalho de 7,5 cm	0,015	100
Grade com rolo compactador	0,010	100
Grade de dentes	0,015	100
Grade de dentes flexíveis	0,018	100

Continua...

Tabela 4. Continuação.

Implemento agrícola utilizado no preparo do solo	RR _o (m)	T _{ds} (%)
Grade de discos aradora pesada tipo tandem com espaçamento entre discos maior que 10 polegadas	0,026	15
Grade de discos de simples ação	0,026	15
Grade de discos niveladora com espaçam. entre discos de 7 a 9 polegadas	0,026	100
Grade de discos tipo tandem aradora com espaçamento entre discos maior que 9 polegadas	0,026	40
Grade de discos tandem leve para incorporação de resíduos vegetais	0,026	20
Grade de molas	0,015	100
Semeadora de precisão, plantio direto	0,012	100
Semeadora em linha de precisão com discos sulcadores duplos	0,012	100
Semeadora em linha, contínua, com disco sulcador duplo	0,012	40
Semeador em linha, contínua, com sulcador de maior profundidade com espaçamento de 12 polegadas	0,012	60
Semeadora em linha, contínua, com sulcador de enxada	0,012	60
Semeadora em linha, contínua, com um único disco sulcador	0,012	90
Semeadora em linha, contínua, para plantio direto com disco de corte de palha corrugado	0,012	85
Semeadora em linha, contínua, p/ plantio direto com disco de corte de palha liso	0,012	80
Semeadora em linha, contínua com sulcador semiprofundo, espaçamento 7 a 12 polegadas	0,012	90
Semeadoras para sementes miúdas, plantio direto	0,012	85
Subsolador combinado com discos	0,015	100
Subsolador em forma de "V" espaçados de 50 cm	0,015	100

Fonte: [Alberts et al. \(1995\)](#).



Figura 3. Imagens utilizadas para representação da rugosidade randômica provocada pela ação do implemento de preparo do solo, (RENARD et al. 1997).

Intensidade de precipitação

A intensidade de precipitação sob um pivô-central varia continuamente com o tempo. [Heermann & Hein \(1968\)](#), assumindo modelo de distribuição da precipitação semi-elíptico ou triangular, apresentaram equações para descrever a intensidade de precipitação sob um pivô-central. [Kincaid et al. \(1969\)](#) conduziram experimentos de campo para testar a validade dessas equações e verificaram que os valores de intensidade de precipitação calculados considerando modelo de distribuição semi-elíptico representaram melhor os valores experimentais.

[Allen \(1990\)](#) considerou o modelo de distribuição de precipitação semi-elíptico e expressou a intensidade de precipitação, em função da lâmina aplicada, pela equação

$$i_p(L) = i_{pm} \left[1,05 - 1,6 \left(\frac{\pi}{2} \right)^2 \left(\frac{L(t)}{L_p} - 0,5 \right)^2 \right]^{0,5} \quad (30)$$

em que

$i_p(L)$ = intensidade de precipitação em função da lâmina aplicada ao solo, mm h⁻¹;

i_{pm} = intensidade de precipitação máxima real, mm;

$L(t)$ = lâmina aplicada ao solo em função do tempo, mm; e

L_p = lâmina total a ser aplicada, mm.

A lâmina total a ser aplicada é calculada pela equação

$$L_p = \frac{IRN}{DE_{pa}} \quad (31)$$

em que

IRN = irrigação real necessária, mm; e

DE_{pa} = eficiência de distribuição, decimal.

A IRN é calculada pela equação

$$IRN = \frac{(CC - PMP) \rho_g Z f_a}{10} \quad (32)$$

em que

- CC = umidade correspondente à capacidade de campo, % em peso;
 PMP = umidade correspondente a ponto de murchamento, % em peso;
 ρ_g = densidade do solo, g cm⁻³;
 Z = profundidade efetiva do sistema radicular, cm; e
 f_a = fator de disponibilidade de água no solo, adimensional.

A DE_{pa} é calculada pela equação proposta por Allen (1990)

$$DE_{pa} = 100 + (606 - 24,9 pa + 0,349 pa^2 - 0,00186 pa^3)(1 - CUC/100) \quad (33)$$

em que

- pa = porcentagem da área adequadamente irrigada, %; e
 CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen, %.

Segundo [Allen \(1990\)](#), a equação 30 não é definida para $L(t) = 0$ e para $L(t) = L_p$, pois nesses pontos a declividade da curva tende ao infinito.

Intensidade de precipitação máxima admissível

Sempre que a intensidade de precipitação (i_p) exceder a capacidade de infiltração da água no solo (CI), poderá ocorrer o acúmulo de água sobre a superfície do solo e, posteriormente, o escoamento superficial (ES). Para que não ocorra ES em uma área onde a declividade seja maior que zero e não haja presença de vegetação ou de cobertura morta, uma das duas condições deverá ocorrer:

1 - $CI \geq i_p$ durante toda a irrigação (Figura 4) ou

$$2 - A_s \geq \int_{t_{ip}}^{t_{fp}} i_p(t) dt - \int_{t_{ip}}^{t_{fp}} VI(t) dt \quad (\text{Figura 5})$$

em que t_{ip} e t_{fp} são os tempos de início e fim do empoçamento de água sobre a superfície do solo.

Incluindo o efeito do armazenamento superficial, como fator atenuador do escoamento superficial, e incorporando as modificações sugeridas por [Bouwer \(1966\)](#), [Slack \(1980\)](#) e [Bernuth \(1985\)](#), pode-se escrever a equação 1 da seguinte forma

$$VI(t) = K_h \left[1 + \frac{S_w (\theta_w - \theta_i)}{I(t) - A_s} \right] \quad (34)$$

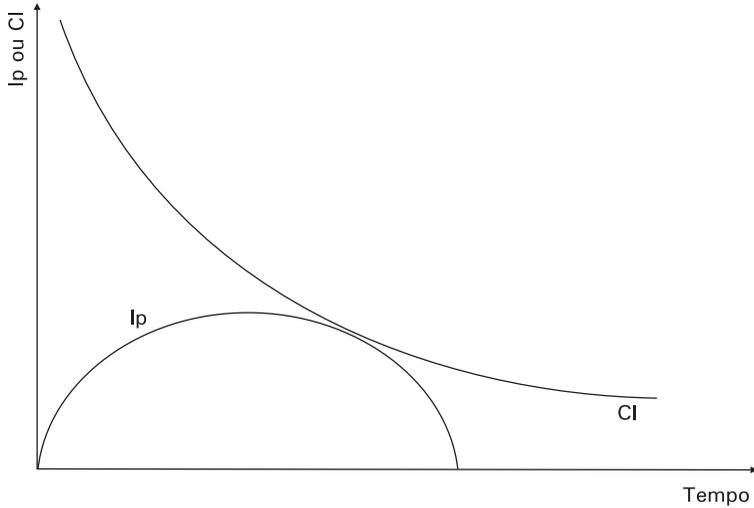


Figura 4. Esquema representativo da capacidade de infiltração da água no solo (CI) e da intensidade de precipitação (i_p) típicas de irrigação por pivô-central, destacando-se o tempo de encheimento (t_p) e a intensidade de precipitação máxima admissível (ipm).

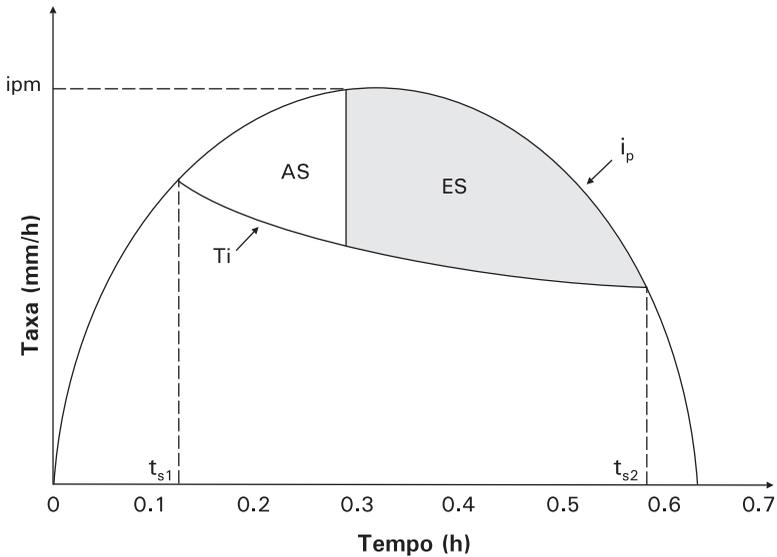


Figura 5. Esquema representativo da taxa de infiltração da água no solo (VI) e da intensidade de precipitação (i_p) em condições típicas de sistemas de irrigação do tipo pivô-central, destacando-se os tempos de início (t_{s1}) e de final (t_{s2}) de armazenamento, o armazenamento (AS) e o escoamento (ES) superficial.

No instante crítico (t_p), momento em que a curva representativa de i_p toca a curva de CI, o valor de i_p é igual ao valor de CI, e são iguais também as declividades das curvas de i_p e CI, ou seja:

$$CI = i_p \quad (35)$$

$$\frac{d(CI)}{d(L(t))} = \frac{d(i_p)}{d(L(t))} \quad (36)$$

Substituindo as equações 30 e 34 nas equações 35 e 36 e fazendo os devidos ajustes, obtêm-se as equações 37, 38 e 39, que, quando resolvidas, fornecem o valor, em mm h^{-1} , da intensidade de precipitação máxima admissível para uma determinada condição de solo, de clima e de cultura.

$$i_{pma} = \frac{4,47 K_h (A_s - L(t) - S_w \theta_d) L_p}{[A_s - L(t)] [L_p (\xi) - 78,96 L^2(t)]^{0,5}} \quad (37)$$

$$\Omega = \frac{44,13 i_{pma} [L_p - 2L(t)]}{5 [L_p \xi - 78,96 L^2(t)]^{0,5} L_p} + \frac{K_h S_w \theta_d}{[A_s - L(t)]^2} \quad (38)$$

$$\frac{d(\Omega)}{d(L(t))} = \frac{2 K_h S_w \theta_d}{[A_s - L(t)]^3} - \frac{1853,80 i_{pma} L_p}{5 \left\{ L_p [\xi - 78,96 L^2(t)]^{1,5} \right\}} \quad (39)$$

sendo

$$\xi = 78,96 L(t) + 1,26 L_p \quad (40)$$

As equações resultantes estão na forma para serem resolvidas pela técnica numérica de Newton-Raphson. O procedimento consiste em se atribuir um valor inicial para $L(t)$ na equação 37 e calcular o valor da intensidade de precipitação máxima admissível. Os valores de $L(t)$ e de i_{pma} são, então, substituídos nas equações 38 e 39, sendo o erro calculado pela equação 40. O procedimento encerra quando o módulo do erro for inferior à precisão desejada. Neste trabalho adotou-se uma precisão de 0,0001. Recomenda-se, com o intuito de otimizar o tempo computacional, iniciar o procedimento com um valor de $L(t) \geq L_p/2$.

$$\text{Erro} = \frac{\Omega}{d(\Omega)/d(L(t))} \quad (41)$$

Avaliação da Metodologia

A avaliação da metodologia desenvolvida foi feita de duas maneiras distintas. Na avaliação I as seguintes situações foram estudadas: a) o comportamento da distribuição ULLN com os parâmetros calculados pelas equações propostas por [Bernuth \(1985\)](#); b) a variação da velocidade de queda da gota em função do seu diâmetro médio; c) a variação da redução da velocidade de infiltração em função das porcentagens de silte e areia; e d) influência do comprimento da lateral do pivô e do modelo do aspersor no valor da intensidade de precipitação máxima admissível.

A avaliação II consistiu em dividir as variáveis que interferem no valor da i_{pma} em dois grupos. O primeiro grupo, chamado aqui de controlável, é composto pelas variáveis que podem ser modificadas pelo projetista, como L_p , $(\theta_s - \theta_i)$ e A_s . O segundo grupo, denominado não-controlável, é composto pelas variáveis que não podem ser alteradas pelo projetista, ou seja, K_s e S_w .

Para realizar as simulações das avaliações I e II variou-se o valor da variável estudada e mantiveram-se os valores das demais constantes.

Por fim é apresentado um exemplo de aplicação do procedimento.

Os valores iniciais das variáveis utilizadas na simulação e no exemplo de aplicação são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Variáveis de entrada e os valores utilizados na avaliação da metodologia.

Variáveis	Valores	Variáveis	Valores
Raio do pivô	= 270 m	Umidade inicial	= 25 %
Lâmina aplicada	= 10 mm	Sw *	= 180 mm
Armazenamento superficial	= 0 mm	%Silte	= 40 %
Condutividade hidráulica	= 27 mm h ⁻¹	%Areia	= 42 %
Umidade de saturação	= 35 %		

*Sw = potencial matricial médio na frente de umedecimento.

Avaliação I

Fator de redução da velocidade de infiltração da água no solo

Para um mesmo pivô, a i_{pma} diminui à medida que se desloca do centro do pivô para sua extremidade, o que se deve ao aumento do diâmetro médio das gotas, que induz a um aumento no fator de redução da velocidade de infiltração da água no solo.

Para simular o efeito do selamento superficial, foi utilizada a equação para cálculo do Fr proposta por [Bernuth & Gilley \(1985\)](#), a qual é função do diâmetro médio da gota, da velocidade de impacto das gotas com o solo e das porcentagens de silte e areia. A compreensão do comportamento dessas variáveis e de como elas se relacionam é essencial para compreensão da tendência de i_{pma} . Na Figura 6 são apresentadas as estimativas do diâmetro médio das gotas (Dg_{50}), estimado por meio da ULLN com os parâmetros calculados pelas equações propostas por [Bernuth \(1985\)](#), em função do diâmetro de bocal do emissor e da pressão de serviço.

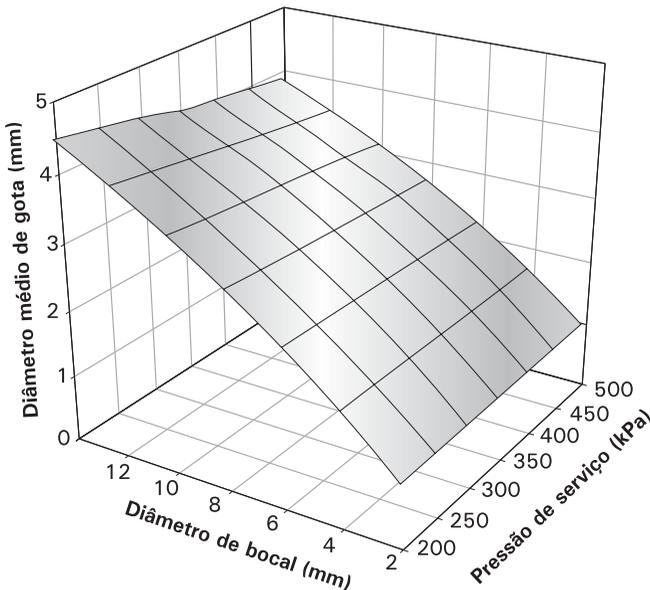


Figura 6. Diâmetro médio das gotas estimado por meio da ULLN com os parâmetros calculados pelas equações propostas por Bernuth (1985), em função do diâmetro de bocal e da pressão de operação do aspersor.

Observa-se, na Figura 6, que o Dg_{50} aumenta à medida que o diâmetro de bocal aumenta. Nota-se, também, que o Dg_{50} varia muito pouco com a pressão de serviço, apresentando pequena tendência de queda com o aumento da pressão. Uma vez que o diâmetro dos bocais aumenta e a pressão de operação diminui do centro do pivô para a extremidade da linha lateral, o Dg_{50} também aumentará. Com o aumento do Dg_{50} tem-se aumento da velocidade de impacto da gota com o solo, e, em consequência, aumenta o Fr e diminui o valor da i_{pma} .

Para calcular a velocidade real de impacto da gota com o solo, faz-se necessário estimar em tempo real o valor do coeficiente C_2 . Para isso, foram obtidos três grupos de equações em função do diâmetro médio das gotas ([Tabela 3](#)).

Na Figura 7 são apresentadas as estimativas das velocidades real e máxima de impacto da gota com o solo e do coeficiente de arrasto em função do diâmetro médio das gotas.

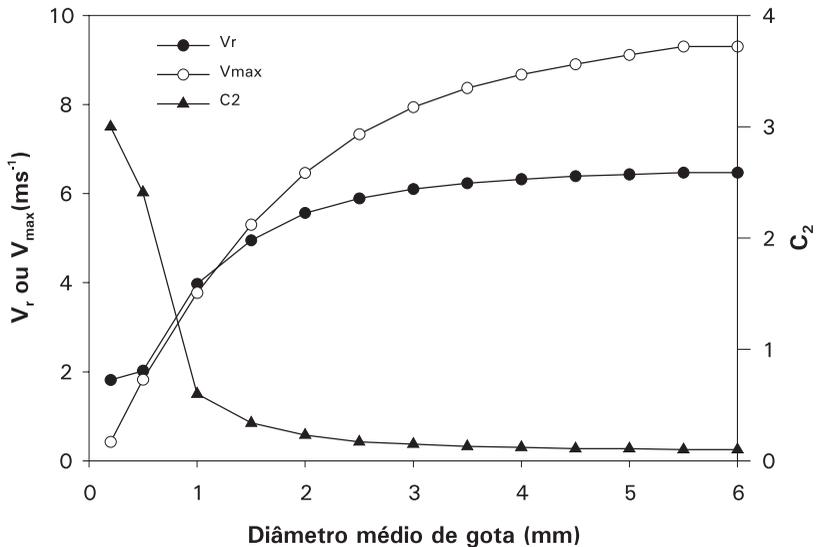


Figura 7. Velocidades real (V_r) e máxima (V_{max}) de impacto das gotas com o solo e coeficiente de arrasto (C_2) em função do diâmetro médio das gotas.

Observa-se que o valor de C_2 diminui com o aumento do Dg_{50} e que tanto o valor de V_r como o de V_{max} aumenta com o aumento do Dg_{50} . A estimativa de V_r foi realizada utilizando-se a técnica numérica de Runge-Kutta de quarta ordem.

Para cálculo do valor de V_{max} utilizou-se a equação de regressão desenvolvida neste trabalho (equação 24). Observa-se na [Figura 7](#) que, até Dg_{50} igual a 1,2 mm, V_{max} foi inferior a V_r , o que mostra a importância de se corrigir o valor de V_r em função de V_{max} , principalmente em posições próximas ao centro do pivô, ou em pivôs de pequeno comprimento, em que o diâmetro médio das gotas é pequeno. Consta-se que a não-correção do valor da V_r resulta em superestimativa de Fr e em consequência subestimativa de i_{pma} .

Além do diâmetro médio das gotas e da velocidade de impacto dessas com o solo, a textura do solo também influencia diretamente o valor do Fr . Na [Figura 8](#) são apresentadas as estimativas do fator de redução da VI em função das porcentagens de areia e silte.

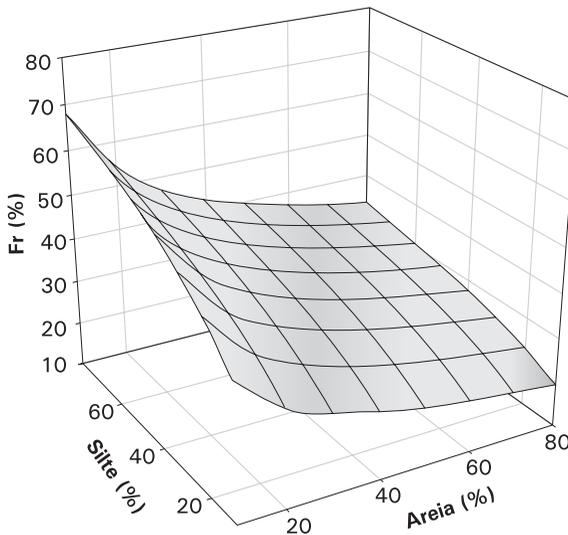


Figura 8. Fator de redução da velocidade de infiltração (Fr) em função das porcentagens de silte e areia.

Nota-se que Fr diminui com o aumento da porcentagem de areia e aumenta à medida que a porcentagem de silte aumenta. Isto quer dizer que solos mais arenosos possuem maior valor de i_{pma} , uma vez que a redução na velocidade de infiltração é menor.

Intensidade de precipitação máxima admissível

Para fins de análise, pode-se considerar a intensidade de precipitação máxima admissível como um parâmetro indicativo do maior ou menor risco de escoamento superficial. Maiores valores de i_{pma} estão associados a áreas com menor risco de ocorrência de ES, e menores valores de i_{pma} estão associados a áreas com maior risco de ocorrência de ES.

O comprimento da lateral do pivô (CL), a lâmina a ser aplicada, o modelo do emissor utilizado e as características físico-hídricas do solo afetam direta ou indiretamente o valor da i_{pma} . A influência do comprimento da lateral do pivô e do modelo do emissor utilizado no valor da i_{pma} pode ser observada na Figura 9. Na Figura 9 pode-se observar que, à medida que CL aumenta, diminui o valor da i_{pma} ; tal constatação é mais evidente nos sistemas dotados de aspersores de impacto, ou seja, para as mesmas condições de solo e lâmina a serem aplicadas, quanto maior CL, maior o risco de ocorrência de escoamento superficial. Isto se deve à própria característica do pivô, que tem de irrigar uma área cada vez maior à medida que se afasta do seu centro. Dessa forma, para se ter uma aplicação uniforme, é necessário que a vazão aplicada por unidade de comprimento aumente à medida que se afastar do centro do pivô. Para que isto se cumpra, o diâmetro do bocal dos aspersores deve aumentar do centro do pivô para a extremidade. Assim, haverá aumento, no mesmo sentido, do diâmetro médio das gotas, com conseqüente aumento do selamento superficial e redução da i_{pma} .

É relevante ressaltar a menor influência do CL na i_{pma} em sistemas com aspersores do tipo difusor, o que se deve à pequena variação do diâmetro médio das gotas nesse tipo de sistema, resultando em uma menor variação da i_{pma} .

Observa-se, na [Figura 9](#), que a i_{pma} de sistemas equipados com aspersores tipo difusores é maior do que a i_{pma} de sistemas equipados com aspersores tipo impacto, isto é, analisando apenas a i_{pma} e considerando as mesmas condições de solo e lâmina a serem aplicadas, sistemas equipados com aspersores tipo difusores apresentam menor risco de ocorrência de ES. Nota-se também que, entre os sistemas analisados, aquele equipado com aspersores de impacto de alta pressão é o que apresenta maior risco de ocorrência de ES.

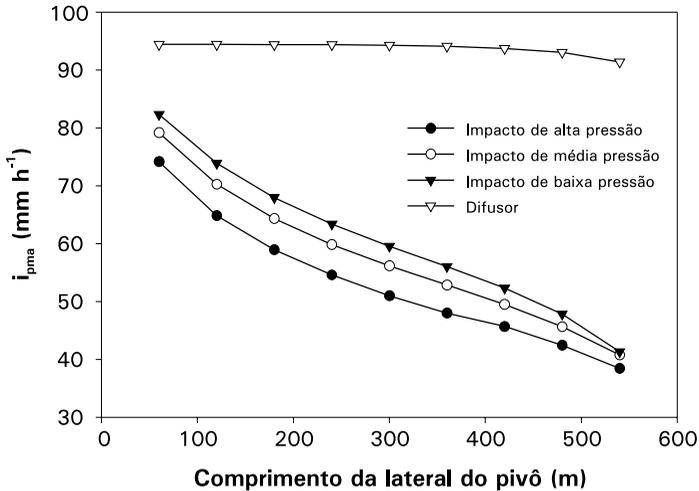


Figura 9. Influência do comprimento da lateral do pivô e do modelo do aspersor no valor da intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}), considerando o diâmetro médio das gotas calculado pela distribuição ULLN.

Avaliação II

Em todos os casos simulados considerou-se o pivô dotado de aspersores de impacto de alta pressão e foram utilizadas as condições apresentadas na [Tabela 5](#).

Variáveis controláveis

Na [Figura 10](#) apresenta-se a estimativa da i_{pma} em função da lâmina aplicada. A simulação foi realizada considerando um déficit de umidade de água no solo no momento da irrigação igual a 0,10. Ressalta-se, ainda, que os valores apresentados na [Figura 10](#) são relativos ao último aspersor da linha lateral para um pivô equipado com aspersores de impacto de alta pressão.

Nota-se que o valor da i_{pma} diminui com o aumento da lâmina aplicada. Embora essa simulação tenha sido realizada para condições específicas, o comportamento observado, de queda da i_{pma} com o aumento da lâmina aplicada, é válido para qualquer condição. Esse comportamento é devido ao fato de que, com o aumento da lâmina aplicada, aumenta-se também a lâmina infiltrada acumulada, o que implica redução da velocidade de infiltração (equação 34).

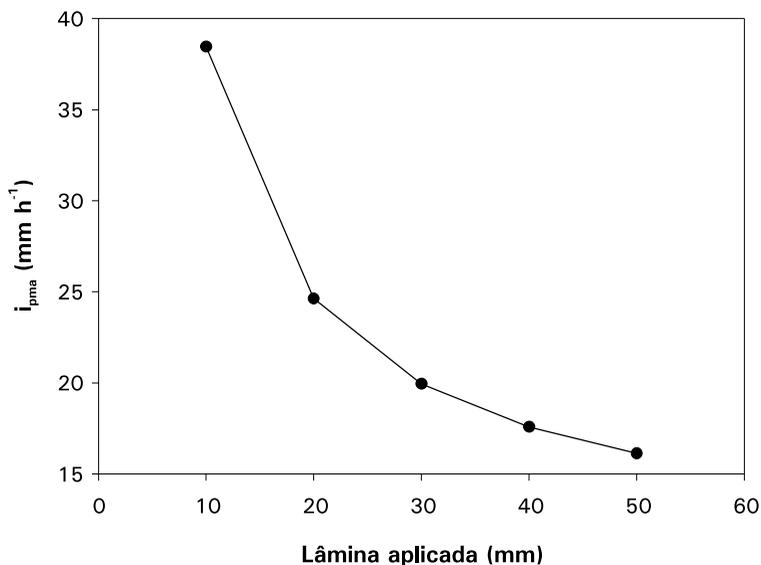


Figura 10. Intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}) em função da lâmina aplicada para o último aspersor da linha lateral.

A partir da Figura 10 pode-se inferir que, para lâminas de irrigação tendendo para zero, a i_{pma} tende para ∞ , e que para valores de lâmina de irrigação tendendo para ∞ , a i_{pma} tende para o valor calculado pela equação 11.

Verifica-se, também, que a variação no valor da i_{pma} é mais acentuada para lâminas menores. Por exemplo: se de um lado, quando a lâmina passou de 10 para 20 mm, a i_{pma} passou de 38,5 para 24,6 mm h⁻¹, havendo, portanto, uma variação no valor da i_{pma} de 13,9 mm h⁻¹. Por outro lado, quando a lâmina passou de 40 para 50 mm, a i_{pma} passou de 17,6 para 16,1 mm h⁻¹, havendo, portanto, uma variação no valor de i_{pma} de 1,5 mm h⁻¹. Esse resultado permite concluir que o risco de ocorrência de escoamento superficial devido a uma falha do operador é maior em sistemas dimensionados para se aplicarem pequenas lâminas de irrigação, isto é, a interferência do operador nesses sistemas deve ser realizada de maneira mais criteriosa.

Na [Figura 11](#) apresenta-se a estimativa da i_{pma} em função da posição ao longo da lateral do pivô e do déficit de umidade no solo no momento da irrigação.

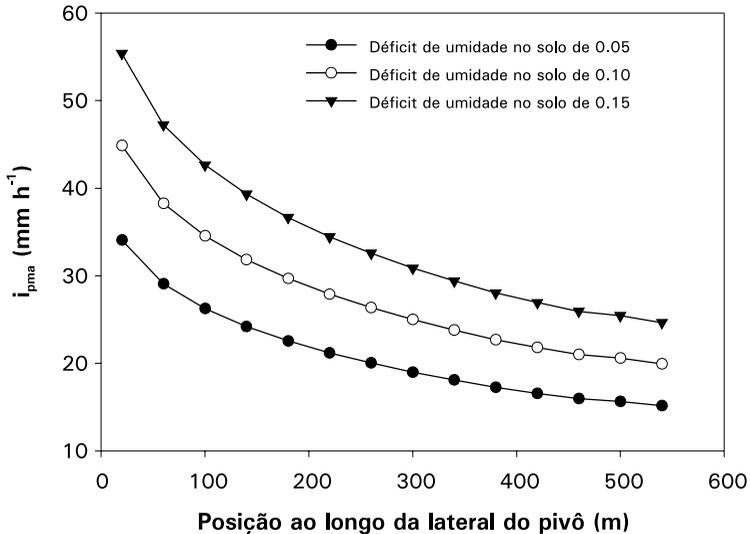


Figura 11. Intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}) em função da posição ao longo da lateral do pivô e do déficit de umidade no solo.

Observa-se, na Figura 11, que a i_{pma} aumenta com o aumento do déficit de umidade de água no solo. Pela análise da equação 34, observa-se que, quanto maior o valor do déficit, maior o valor da VI e, em consequência, maior será o valor da i_{pma} . Dessa figura, pode-se concluir que sistemas sujeitos a irrigações menos frequentes são menos sujeitos à ocorrência de ES, o que vem reforçar a conclusão apresentada anteriormente, ou seja, sistemas que aplicam lâminas maiores e menos frequentes são menos sensíveis à interferência do operador.

Na [Figura 12](#) apresenta-se a estimativa da i_{pma} em função do armazenamento superficial. Verifica-se que o valor da i_{pma} aumenta com o aumento do valor do armazenamento superficial. Dobrando-se o valor do A_s (3 para 6 mm), houve aumento de aproximadamente 10% no valor da i_{pma} (21,6 para 23,7 mm h⁻¹). Isto vem reforçar os resultados apresentados por [Aarstad & Miller \(1973\)](#), que sugerem a utilização de bacias de armazenamento, com finalidade de minimizar a ocorrência de ES.

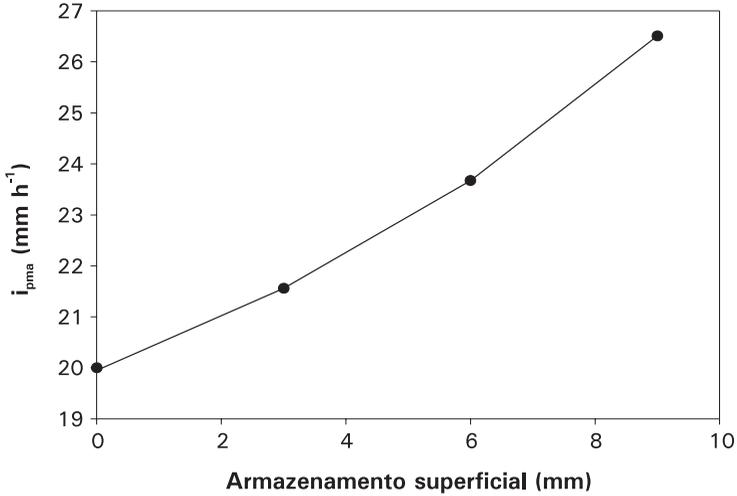


Figura 12. Intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}) em função do armazenamento superficial.

Variáveis não-controláveis

Na Figura 13 apresenta-se a estimativa da i_{pma} em função da posição ao longo da lateral do pivô e da condutividade hidráulica do solo saturado.

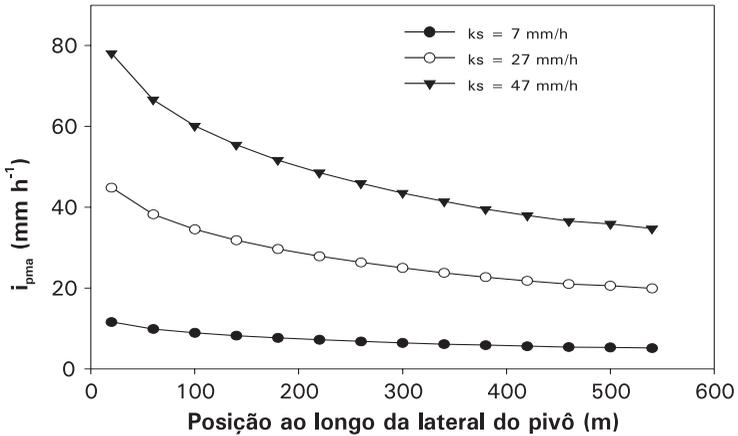


Figura 13. Intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}) em função da posição ao longo da lateral do pivô e da condutividade hidráulica do solo saturado (K_s).

Observa-se que a i_{pma} aumenta com o aumento da K_s . Nota-se, na [Figura 13](#), que, quanto maior o valor de K_s , maior a diferença entre a i_{pma} no início e no final da lateral. Esse resultado indica que quanto maior o valor de K_s , maior poderá ser a área irrigada. Baixos valores de i_{pma} são típicos de solos com baixa condutividade hidráulica; nesses solos, sistemas de irrigação de alta pressão estão menos sujeitos a provocar ES, uma vez que possuem maior diâmetro de alcance e, conseqüentemente, menor intensidade de precipitação.

Na Figura 14 apresenta-se a estimativa da i_{pma} em função do potencial matricial médio na frente de umedecimento.

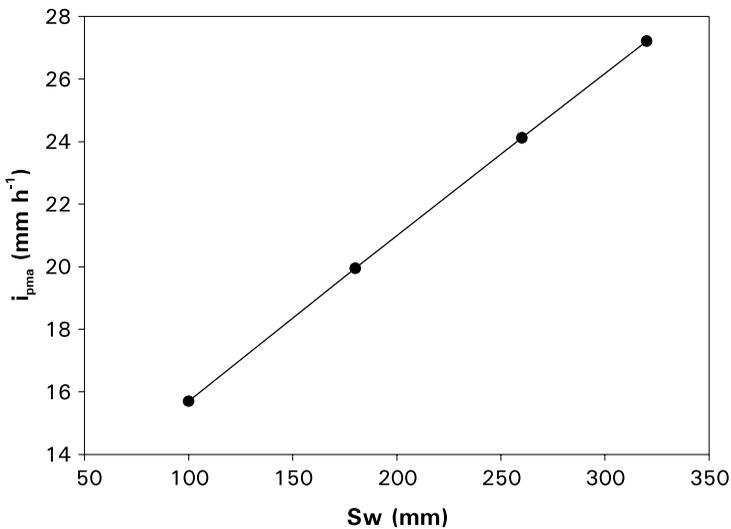


Figura 14. Intensidade de precipitação máxima admissível (i_{pma}) em função do potencial matricial médio na frente de umedecimento (Sw).

Observa-se que a i_{pma} aumenta de forma aproximadamente linear com o aumento do Sw . Tendo em vista que solos argilosos apresentam Sw superior àqueles obtidos em solos arenosos, poder-se-ia se concluir, erroneamente, que a i_{pma} de um solo argiloso é superior àquela de um solo arenoso. Entretanto, tal constatação não é verdadeira, pois a i_{pma} é mais sensível ao K_s do que ao Sw . Por exemplo, para um pivô-central de raio igual a 540 m obteve-se, para o último aspersor, i_{pma} igual a 91,8 mm h^{-1} para um solo arenoso com $K_s = 110 \text{ mm h}^{-1}$ e $Sw = 30 \text{ mm}$ e igual a 4,6 mm h^{-1} para um solo argiloso com $K_s = 6 \text{ mm h}^{-1}$ e $Sw = 260 \text{ mm}$. As características dos solos apresentados são devidas a [Bernuth \(1985\)](#).

As análises realizadas indicam que a i_{pma} é sensível aos parâmetros de solo. Dessa forma, pode-se concluir que práticas conservacionistas e culturais que contribuam para o aumento da VI e do armazenamento superficial podem ser utilizadas com intuito de se evitar o escoamento superficial e, conseqüentemente, aumentar a eficiência do sistema e reduzir o gasto com energia.

Exemplo de aplicação

Esse exemplo será conduzido apenas para o primeiro emissor da lateral do pivô. Os cálculos foram feitos considerando-se aspersion de alta pressão, localizado a 10,8 m do ponto pivô, possui um diâmetro de bocal de 1,77 mm e uma pressão de operação de 634 kPa. Considerou-se ainda que $k_w = 0,5$ ks e que $\theta_w = 0,9 \theta_s$.

De posse do diâmetro de bocal e da pressão pode-se, por meio das equações 13, 14, 15 e 16, calcular o diâmetro médio da gota produzida por esse aspersion (0,89577 mm). Com essa informação calcula-se, por meio das equações 19, 20, 21 e 22, a velocidade de impacto da gota com a superfície do solo (3,401482 m s⁻¹). Pode-se, assim, calcular por meio da equação 12 o fator de redução de velocidade de infiltração (10,738634 %) e o novo valor da condutividade hidráulica (12,050284 mm h⁻¹).

De posse dessas informações calcula-se a intensidade de precipitação máxima admissível por meio das equações 37, 38, 39 e 41. Na Tabela 6 são apresentados os valores obtidos em cada passo da simulação.

Tabela 6 . Resultado da aplicação do método de Newton-Raphson para obtenção da intensidade de precipitação máxima admissível.

N.I. ⁽¹⁾	$i_{pma}^{(2)}$ (mm h ⁻¹)	Ω	$\frac{d(\Omega)}{d(L(t))}$	Erro	L(t)
1					5*
2	39,27797684	5,639533042	-3,769075462	-1,496264296	6,4962642958
3	34,42033773	1,267443841	-2,541622583	-0,4986750785	6,9949393742
4	34,08315318	0,0407370140	-2,498416387	-0,01630513402	7,011244508
5	34,0828013⁽³⁾	0,000017232	-2,499945214	-0,0000068930	

⁽¹⁾ Número de iterações; ⁽²⁾ Intensidade de precipitação máxima admissível; ⁽³⁾ Resultado final da iteração.

*L(t) = Lp/2.

Na Figura 15 são apresentados os valores teóricos da intensidade de precipitação máxima real e máxima admissível para aspersor de impacto de alta e baixa pressão em função de sua posição ao longo da lateral.

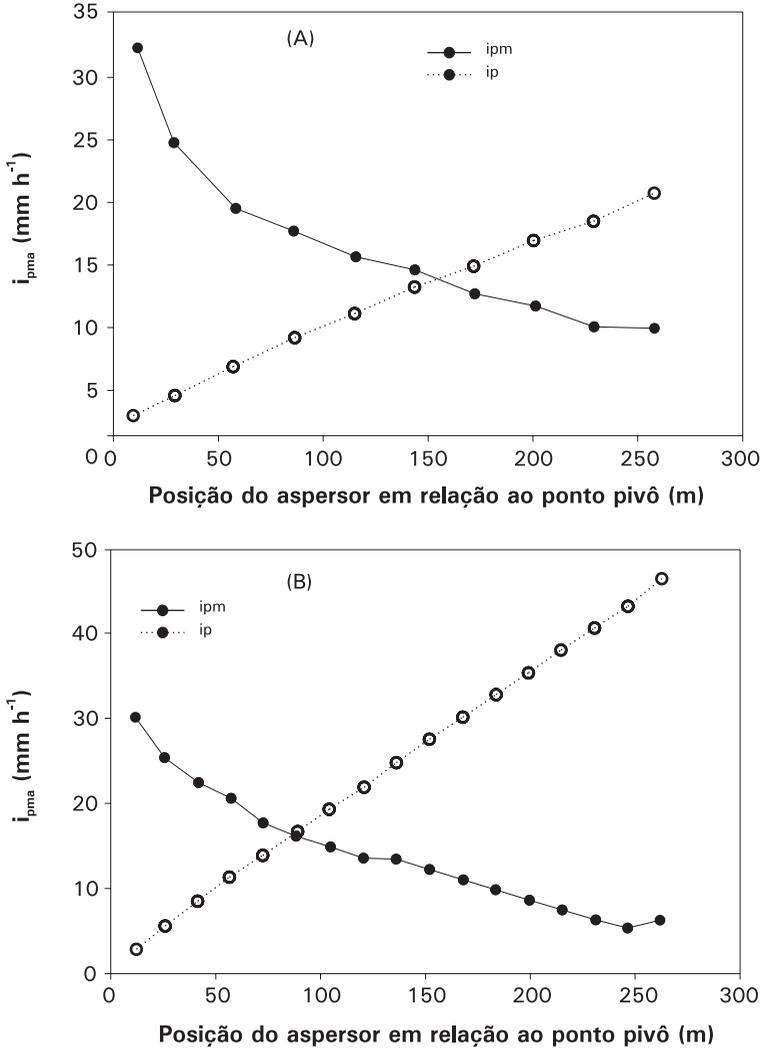


Figura 15. Valores da intensidade de precipitação máxima real (ipm) e máxima admissível (ipma) para pivôs com aspersores de alta (A) e baixa (B) pressão.

Para minimizar os gastos com energia, deve-se, sempre que possível, fazer i_{pm} tender para i_{pma} . Assim, as informações apresentadas na [Figura 15](#) são de suma importância para o projetista. Se a linha representativa da $i_{pma} \geq i_{pm}$ não haverá ES. A condição de mínimo gasto com energia será aquela em que se tem para o último aspersor da linha lateral $i_{pma} = i_{pm}$.

A análise da [Figura 15](#) permite ao projetista obter duas conclusões distintas e que o conduzirá a tomar decisões diferentes. Se fosse utilizado um sistema de alta pressão, representado pela [Figura 15A](#), o maior pivô que poderia ser instalado na área de tal forma a não haver escoamento superficial seria de 143 m, esse, também, seria o equipamento com menor gasto com energia, uma vez que $i_{pm} \cong i_{pma}$. Já se fosse escolhido um pivô composto de aspersores de baixa pressão, representado pela [Figura 15B](#), o maior pivô que poderia ser instalado seria de 90 m, ponto onde ocorre o cruzamento das linhas representativas de i_{pma} e de i_{pm} .

Conclusões

1. O valor da intensidade de precipitação máxima admissível diminui com o aumento do raio do pivô-central, com o aumento da lâmina aplicada, com a redução do déficit de umidade no solo, com a redução no armazenamento superficial, com a redução da condutividade hidráulica do solo saturado e com a redução do potencial matricial médio na frente de umedecimento; e
2. A metodologia desenvolvida mostrou-se sensível aos principais parâmetros que interferem na intensidade de precipitação máxima admissível, constituindo-se em uma ferramenta que pode ser utilizada durante o dimensionamento para selecionar um pivô-central com base na intensidade de precipitação máxima admissível ou para estimar, durante uma irrigação, a intensidade de precipitação máxima admissível em pontos específicos da área irrigada.

Referências Bibliográficas

- AARSTAD, J. S.; MILLER, D. E. Soil management to reduce runoff under center-pivot sprinkler systems. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 28, n. 4, p. 171-173, 1973.
- ALBERTS, E. E.; NEARING, M. A.; WELTZ, M. A.; RISSE, L. M.; PIERSON, F. B.; ZHANG, X. C.; LAFLEN, J. M.; SIMANTON, J. R. Soil component. In:

FLANANGAN, D. C.; NEARING, M. A. (Ed.). **Water Erosion Prediction Project (WEPP)**. West Lafayette: USDA: NSEAL, 1995. Paginação irregular. (Technical Documentation. NSERL Report n. 10).

ALEXANDRATOS, N. **Agricultura mundial: hacia el año 2010**. Roma: FAO; Madri: Mundi-Prensa, 1995. 493 p.

ALLEN, R. G. Applicator section along center pivots using soil infiltration parameters. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 3., 1990, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: ASAE, 1990. p. 549-555.

BEN-HUR, M.; PLAUT, Z.; SHAINBERG, I.; MEIRI, A.; AGASSI, M. Cotton canopy and drying effects on runoff during irrigation with moving sprinkler systems. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 752-757, 1989.

BERNUTH, R. D.; GILLEY, J. R. Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 5, p. 1435-1441, 1984.

BERNUTH, A. **Physically based analysis of potential runoff under center pivot irrigation incorporating infiltration reduction**. 1985. 124 f. Tese (Doutorado) – University of Nebraska, Lincoln, 1985.

BERNUTH, R. D.; GILLEY, J. R. Evaluation of center pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 6, p. 1940-1946, 1985.

BEZDEK, J.C.; SOLOMON, K. H. Upper limit lognormal distribution for drop size data. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 109, n. 1, p. 72-88, 1983.

BOWER, H. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. **Water Resources Research**, Washington, v. 2, n. 4, p. 729-738, 1966.

BOWER, H. Infiltration of water into nonuniform soil. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 95, n. 4, p. 451-462, 1969.

BRUTSAERT, W. Some methods of calculating unsaturated permeability. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 10, n. 3, p. 400-404, 1967.

CHU, S. T. Infiltration during an unsteady rain. **Water Resources Research**, Washington, v. 14, n. 3, p. 461-466, 1978.

- Companhia energética de Minas Gerais - CEMIG. **Estudo de otimização energética; setor irrigação - pivô-central**. Belo Horizonte, 1993. 22 p. Relatório desenvolvido pela CEMIG em parceria com a UFV.
- EIGEL, J. D.; MOORE, I. D. A. Simplified technique for measuring raindrop size and distribution. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 26, n. 4, p. 1079-1084, 1983.
- ELLISON, W. D. Studies of raindrop erosion. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, v. 25, n. 4, p. 131-136, 1944.
- EVANS, R. G. "If You Build it, Will it Work? Testing Precision Center-Pivot Irrigation". In: **Precision Agriculture: a supplement to GPS World Magazine**. Eugene: Advanstar Communications, 1997. p. 10-17.
- FUKUI, Y.; NAKANISHI, K.; OKAMURA, S. Computer evaluation of sprinkler uniformity. **Irrigation Science**, New York, v. 2, p. 23-32, 1980.
- GAYLE, G. A.; SKAGGS, R. W. Surface storage on bedded cultivated lands. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 21, n. 1, p. 101-104, 1978.
- GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.
- HACHUM, A. Y.; ALFARO, J. F. Rain infiltration into layered soils: prediction. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 106, n. 4, p. 311-319, 1980.
- HEERMANN, D. F.; HEIN, P. R. Performance characteristics of self-propelled center-pivot sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 11, n. 1, p. 11-15, 1968.
- KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 625 p.
- KINCAID, D. C.; HEERMANN, D. F.; KRUSE, E. G. Application rates and runoff in center-pivot sprinkler irrigation: sprinklers. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 12, n. 6, p. 790-794, 1969.
- KINCAID, D. C. Spraydrop kinetic energy from irrigation sprinklers **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 121, n. 2, p. 152-158, 1996.
- LI, J.; KAWANO, H. Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 118, n. 2, p. 291-305, 1992.

McINTYRE, D. S. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. **Soil Science**, Baltimore, v. 85, n. 4, p. 185-189, 1958.

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, Washington, v. 9, n. 2, p. 384-394, 1973.

MOHAMOUD, Y.; McCARTY, T. R.; EDWING, L. K. Optimum center-pivot irrigation system design with tillage effects. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 118, n. 2, p. 291-305, 1992.

MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. The european soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Version 3.6. Silsoe: 1998. 89 p. Apostila

OLIVEIRA, R. A. **Distribuição de gotas por tamanho e perfil de precipitação de um aspersor fixo**. 1991. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

ONSTAD, C. A.; OLSON, T. C.; STONE, L. R. An infiltration model tested with monolith moisture measurements. **Soil Science**, Baltimore, v. 116, n. 1, p. 13-17, 1973.

ONSTAD, C. A. Depressional storage on tilled soil surfaces. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27, n. 3, p. 729-732, 1984.

POTTER, K. N. Soil properties effect on random roughness decay by rainfall. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 6, p. 1889-1892, 1990.

RAWLS, W. J.; DAVID, G.; VAN MULLEN, J. A.; WARD, T. J. Infiltration. In: ASCE. **Hydrology Handbook**. 2. ed. New York, 1996. p. 75-124. (ASCE Manuals and Report on Engineering Practice, 28).

RENARD, K. G.; FOSTER, G. R.; WEESIES, G. A.; McCOOL, D. K.; YODER, D. C. (Coord.). **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Tucson: USDA: ARS, 1997. 384 p. (Agricultural Handbook, 703).

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A. D. D.; SILVA. Metodologia para estimativa da intensidade de precipitação máxima admissível em pivô-central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 151-162, 1999.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô-central com o uso da equação de Green-Ampt. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Resumos...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. 1 CD-ROM.

SEGINER, I. Tangencial velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 23, n. 3, p. 596-699, 1980.

SKAGGS, R. W.; HUGGINS, L. E.; MONKE, E. J.; FOSTER, G. R. Experimental evaluation of infiltration equations. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 12, n. 6, p. 822-828, 1969.

SLACK, D. C. Modeling infiltration under moving sprinkler irrigation system. **Transactions of the ASCE**, Reston, v. 8, n. 1, p. 90-93, 1980.

SMITH, R. E.; PARLANGE, J.Y. A parameter-efficient hydrologic infiltration model. **Water Resources Research**, Washington, v. 14, n. 3, p. 533-538, 1978.

SOR, K.; BERTRAND, A. R. Effects of rainfall energy on permeability of soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 3, p. 293-297, 1962.

STONE, J.; RENARD, K. G.; LANE, L. J. Runoff estimation on agricultural fields. In: AGASSI, M. (Ed.). **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-22.

TACKETT, J. L.; PEARSON, R. W. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. **Soil Science**, Baltimore, v. 99, n. 6, p. 407-413, 1965.

ZIRBEL, M. L.; LARSON, C. L.; SLACK, D. C. **Laboratory method for evaluation Green-Ampt infiltration parameters**. St. Joseph: ASAE, 1982. 12 p. (ASAE Paper 82-2033).

Procedure to Estimate the Center Pivot Maximum Application Rate Based on Equipment and Soil Characteristics

Abstract – *A procedure to estimate the center pivot maximum application rate, based on equipment and soil characteristics is presented. It was developed to minimize the surface runoff. To achieve this objective, the Green and Ampt (GA) infiltration equation was modified to include surface sealing and surface storage. The highest application rate is determined by solving a system of equations which incourt to application rate and its derivative and the GA and its derivative. Sensitivity analysis showed that the procedure represented adequately the variation in the main parameters that interfere in the value of the maximum application rate. This methodology can be used to design the optimum center pivot irrigation system for a given combination of soil, climate, cropping pattern, and tillage practice. It can also be used to estimate the maximum application rate during irrigation for specific patches within the irrigated area.*

Index terms: surface runoff, precision agriculture, infiltratim equation, sensitivity analysis.