

JOÃO HÉLIO TORRES D'ÁVILA

**MODELO PARA SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA  
IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL, CONSIDERANDO A  
UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA, O CUSTO DO SISTEMA  
E A PRODUTIVIDADE DA CULTURA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de "Doctor Scientiae".

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2000

JOÃO HÉLIO TORRES D'ÁVILA

**MODELO PARA SIMULAÇÃO E DIMENSIONAMENTO DA  
IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO CONVENCIONAL, CONSIDERANDO A  
UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA, O CUSTO DO  
SISTEMA E A PRODUTIVIDADE DA CULTURA**

Tese apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de "**Doctor  
Scientiae**".

APROVADA: 31 de agosto de 2000

Prof. Everardo Chartuni Mantovani, DS  
Conselheiro

Prof. Márcio Mota Ramos, DS  
Conselheiro

Dr. Ricardo Augusto Lopes Brito, Ph.D  
EMBRAPA/CNPMS

Prof. Teodorico Alves Sobrinho, DS  
UFMS

Prof. Antônio Alves Soares, Ph.D  
Orientador

À minha esposa Sande.  
Aos meus filhos Rafael, Ana Karine e Caroline.  
Aos meus pais Salustiano (in memoriam) e Raimundira.  
Aos meus irmãos Maria Helena, Ana Maria e Francisco Carlos.

Dedico.

## **AGRADECIMENTO**

A DEUS Pai, presente em todos os momentos, pela fé, perseverança e espírito de luta para eu vencer todas as dificuldades.

À Universidade Federal do Ceará, por intermédio do Centro de Ciências Agrárias, pela liberação e apoio para a realização do Curso.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, através do programa PICDT, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Antônio Alves Soares, pelos ensinamentos, pela amizade, e pela orientação neste estudo.

Aos Professores Conselheiros, Everardo Chartuni Mantovani e Márcio Mota Ramos, pela atenção e pela colaboração com valiosas sugestões.

Ao Projeto SISDA/DEA, coordenado pelos professores Luiz Cláudio Costa e Everardo Chartuni Mantovani, pelo apoio na área computacional.

A toda a minha família, parentes e amigos, pelo estímulo e apoio.

A minha esposa Sande, companheira e amiga, pelo apoio, pelo carinho, pela compreensão e valiosa colaboração em todos os momentos desta caminhada.

Aos meus filhos Rafael, Ana Karine e Caroline Maria, pelo carinho e compreensão nas distâncias e ausências.

Aos colegas Brauliro Gonçalves Leal e Anderson Francisco da Silva pelo trabalho computacional realizado.

A todos os demais colegas, pela amizade e agradável convívio durante o Curso.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, com quem tive oportunidade de me relacionar, pelo apoio e incentivo.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV, pelo pronto atendimento a todas as necessidades durante o Curso.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho e que ficaram no anonimato.

## **BIOGRAFIA**

**João Hélio Torres D'Ávila**, filho de Salustiano Souza Paes e Raimundira Torres Ávila, nasceu em Sobral, CE, no dia 19 de agosto de 1954.

Engenheiro agrônomo, 1976, pelo Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará.

Pesquisador da Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura, da Universidade Federal do Ceará, 1977 a 1983.

Mestre em Agronomia, área de concentração em Irrigação e Drenagem, 1983, pela Universidade Federal do Ceará.

Professor da Escola Agrotécnica Federal de Sousa, PB, 1983 a 1993.

Licenciatura plena em Ciências Agrícolas, 1984, pela Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Professor da Universidade Federal do Ceará, desde 1993, lotado na Coordenadoria de Extensão do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará.

Doutorando em Engenharia Agrícola, área de concentração em Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, MG, iniciando o curso em março de 1996.

## CONTEÚDO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	05
2.1. A aplicação de água pelo aspersor	05
2.1.1. Perfil de distribuição do aspersor	08
2.1.2. Espaçamento entre os aspersores	12
2.1.3. Velocidade e direção do vento	12
2.2. Distribuição de gotas por tamanho	16
2.3. Medidas e predições da distribuição da água	19
2.3.1. Coeficiente de uniformidade	19
2.3.2. Estimativa da distribuição da água	22
2.4. Produtividade da cultura	28
2.4.1. Coeficiente de déficit	30
2.4.2. Precipitação	32
2.4.3. Evapotranspiração	33
2.4.4. Coeficiente de resposta da cultura (ky)	35
2.4.5. Produtividade máxima da cultura	36

2.4.6. Produtividade real da cultura	37
2.5. Lucro financeiro	38
3. O MODELO COMPUTACIONAL	40
3.1. Balística da gota d'água	42
3.2. Módulo de simulação da distribuição da água no solo	44
3.3. Módulo de simulação da produtividade das culturas	49
3.3.1. Modelo combinado	57
3.3.2. Coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ )	57
3.3.3. Produtividade máxima da cultura ( $Y_{mp}$ )	58
3.3.4. Balanço hídrico no solo	59
3.3.5. Precipitação efetiva	60
3.3.6. Cálculo da $ET_c$	61
3.3.7. Cálculo do escoamento superficial	62
3.3.8. Cálculo do excesso hídrico	62
3.3.9. Cálculo da irrigação	62
3.3.10. Produtividade da cultura	63
3.3.11. Cálculo de $C_d$	63
3.3.12. Cálculo de $p$	63
3.4. Módulo de dimensionamento do sistema de irrigação	63
3.4.1. Dados de entrada	64
3.4.2. Dimensionamento hidráulico	64
3.4.3. Seqüência de cálculo	67
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	85
4.1. Vento	89
4.1.1. Efeito da velocidade do vento	90
4.1.2. Direção do vento	96
4.2. Pressão	97
4.3. Efeito do ângulo de trajetória	100
4.4. Declividade	101
4.5. Simulação da produtividade real da cultura	102

4.6. Custo do sistema, uniformidade e produtividade da cultura	105
5. RESUMO E CONCLUSÕES	108
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110

## RESUMO

D'ÁVILA, João Hélio Torres, D.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2000. **Modelo para simulação e dimensionamento da irrigação por aspersão convencional, considerando a uniformidade de distribuição de água, o custo do sistema e a produtividade da cultura.** Orientador: Professor Dr. Antônio Alves Soares. Conselheiros: Prof. Dr. Everardo Chartuni Mantovani e Prof. Dr. Márcio Mota Ramos.

Um modelo computacional, denominado ASPERSOR, foi desenvolvido para simulação e dimensionamento da irrigação por aspersão convencional, sob diferentes condições operacionais, levando-se em conta a uniformidade de aplicação de água e o rendimento da cultura. Utilizando os dados de precipitação e as condições de operação de um aspersor operando em um plano em nível na ausência de vento, o modelo simula as novas precipitações para diversas condições de declividade do terreno, velocidade e direção do vento e pressão de operação do aspersor, entre outras. Utilizando os dados da cultura, do solo, do clima e data de plantio, o modelo simula a evapotranspiração, o turno de rega, e a demanda de irrigação total ou suplementar. Utilizando as informações geradas no módulo produtividade das culturas, juntamente com as informações das características da área a ser irrigada, o modelo dimensiona o projeto de irrigação apresentando como saída: modelo e número de aspersores; número e diâmetro dos tubos das linhas laterais, principal, de recalque e de sucção; nome e quantidade de peças especiais; marca, modelo e potência da bomba; marca, características e potência do motor; custo da mão-de-obra; custo total do projeto e

custo do projeto por hectare. Na validação, o modelo computacional simulou relativamente bem o efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição de água. O modelo foi utilizado para simular o efeito do vento, da declividade do solo, da pressão de operação, do ângulo de inclinação do aspersor, da altura da haste sobre a uniformidade de aplicação de água; além do efeito da uniformidade sobre a produtividade da cultura da soja. Os resultados demonstraram que: o vento provocou concentração de água próximo ao aspersor, principalmente, no sentido contrário ao vento; o raio molhado aumentou no sentido do vento e diminuiu no sentido contrário; os maiores valores de CUC foram alcançados com o vento soprando perpendicularmente à linha lateral; a variação do CUC com a pressão de operação do aspersor foi pequena; a uniformidade de distribuição de água diminuiu com o aumento da declividade do terreno; o modelo superestimou a produtividade da soja para a região de Viçosa, MG; e a uniformidade de aplicação de água teve pouca influência sobre a produtividade da cultura da soja.

## ABSTRACT

D'ÁVILA, João Hélio Torres, D.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2000. **A model to simulate and design economic sprinkler irrigation systems allowing for distribution uniformity, system cost and crop yield.** Adviser: Professor Antônio Alves Soares. Committee members: Professor Everardo Chartuni Mantovani and Professor Márcio Mota Ramos.

A computer model, called ASPERSOR, was developed to simulate and to design hand man sprinkler irrigation systems taking in to account the water application uniformity and the crop yield function. Using the precipitation data from a sprinkler working on a level plane, the model simulates the new precipitation grid for different conditions of ground slope, wind velocity and operation pressure. With the data of crop, soil, climate and planting data, the model simulates the evapotranspiration and the irrigation scheduling. Make using of the crop yield function and the informations from the irrigated area, the model simulates the sprinkler irrigation project giving as results: the number and size of laterals, main lines, suction, pump brake power input, engine power unit, labor costs, total project cost and project cost per hectare. In the validation, the model simulates quite well the wind effect over distribution uniformity. The model was used to simulate the wind effect, the ground slope, the operation pressure, the sprinkler riser and sprinkler angle on the water application uniformity. The

application uniformity over soybean yield was also studied. The results show that: the wind distorts the sprinkler profile causing a increase in water depth close to the sprinkler from the side the wind comes from; the wetted radius decreased in the upward wind and increased downwind; higher uniformity coefficients were obtained with the wind blowing perpendicular to the sprinkler lines; the effect of the sprinkler operation pressure over the uniformity was small; the application uniformity decreased as the ground slope increased; the model overestimated the soybean yield.

## **1. INTRODUÇÃO**

A irrigação tem sido usada não só para melhorar a produtividade das culturas, como também para garantir a produção, quando a precipitação natural não é suficiente para suprir as necessidades hídricas da cultura.

Tradicionalmente, a produção de alimentos no mundo provém de agricultura de sequeiro, dependendo exclusivamente da água advinda da chuva. Entretanto, em razão da crescente demanda de alimentos, torna-se necessário o aumento da produtividade das culturas. Um dos fatores de produção fundamentais para que esse objetivo seja alcançado é o uso da irrigação suplementar, utilizando-se águas dos lagos, rios e lençol freático. Atualmente, estima-se que existam 260 milhões de hectares irrigados no mundo, que correspondem a 17% das terras agricultáveis. Entretanto, 40% da produção vem da agricultura irrigada que, por sua vez, é responsável por 70% da água consumida no mundo. Para produzir alimento suficiente para que todas as pessoas no mundo tenham uma dieta saudável o consumo de água na agricultura deve aumentar de 50 a 100%. Portanto, projetos no sentido de melhorar a eficiência dos sistemas de irrigação existentes e conservar água são vistos com grande interesse pelos especialistas e órgãos de fomento à pesquisa.

Quando bem sucedida, a agricultura irrigada contribui de forma substancial para promover as transformações sociais e econômicas necessárias ao

desenvolvimento de uma região, mediante a geração de renda e oportunidades de emprego, com o aproveitamento da mão-de-obra disponível no meio rural, e o uso intensivo de tecnologia.

Constata-se, entretanto, que a realidade da agricultura irrigada brasileira tem demonstrado que é comum encontrar áreas irrigadas, públicas ou privadas, sem o apropriado planejamento e que, após implementadas, são conduzidas sem a preocupação com o manejo e a operação adequados da irrigação, resultando, com muita frequência, em baixa eficiência, comprometendo assim todo o projeto.

O manejo da irrigação é importante no uso eficiente dos recursos naturais e na produção das culturas. A determinação da quantidade de água necessária para a irrigação é um parâmetro essencial para o planejamento, o dimensionamento e o manejo de qualquer sistema de irrigação, e para a racionalização do uso dos recursos hídricos de uma região.

Para maximizar o lucro na agricultura irrigada, é necessário um bom dimensionamento dos sistemas de irrigação e a adoção de práticas de manejo que melhorem a eficiência da irrigação, e essa adoção é possível com o conhecimento das necessidades hídricas da cultura e do efeito da água no rendimento das plantas.

Dentre os sistemas de irrigação existentes, os por aspersão convencional são os mais empregados, em virtude de suas versatilidades. São geralmente os mais adequados para os múltiplos tipos de cultura, solos, topografia, formas e tamanhos das áreas a irrigar. Além disso, são os que exigem menores custos de implantação e os que permitem maiores flexibilidades de manejo ( GOMES, 1997).

A melhoria na eficiência dos sistemas de irrigação pressurizados está ocorrendo basicamente por razões de economia de água e energia, automatização da operação, preservação do meio ambiente, e ezequibilidade econômica da agricultura irrigada. A tendência atual é que os sistemas sejam de baixa pressão, de modo a reduzir o custo com energia, operados o máximo de tempo possível, inclusive à noite, de fácil manejo e automatizados.

Os sistemas de irrigação usam intensivamente água e energia. A energia representa uma grande fração dos custos de produção de muitas culturas. Nos últimos anos, os sistemas que operam com energia elétrica experimentaram um aumento substancial nos custos, fazendo com que os agricultores procurassem outros meios de produção e de manejo, de modo a garantir uma maior rentabilidade econômica de sua atividade.

Na avaliação de um projeto de irrigação, a eficiência no uso da água destaca-se como um dos parâmetros mais importantes para o sucesso do empreendimento, tanto economicamente como em termos ambientais. Para os sistemas de irrigação apresentarem altas eficiências, a uniformidade de distribuição de água deve ser elevada e um bom manejo deve ser praticado.

A uniformidade de aplicação de água é comumente expressa em termos de um coeficiente de uniformidade, e tem sido a base de comparação do desempenho entre os diversos tipos de aspersores. Os irrigantes sabem, e as pesquisas têm demonstrado que a uniformidade de irrigação influencia diretamente no rendimento das culturas e nos custos do sistema. De um modo geral o aumento na uniformidade de distribuição de água implica num aumento do custo do sistema e por outro lado numa maior produtividade da cultura e conseqüentemente numa maior receita com a produção. Entretanto esse efeito varia de cultura para cultura, e uma análise mais profunda deve ser feita para verificar se é viável economicamente o aumento da uniformidade. Quando não existe limitação de água, a falta de uniformidade tem sido compensada com irrigações, com aplicação de lâminas de água maiores do que as necessárias. Por outro lado, em situações em que a água é limitante, a utilização da irrigação com déficit permite maior retorno econômico que a irrigação completa (CALHEIROS et al., 1996).

Geralmente os sistemas de irrigação por aspersão são dimensionados com base em parâmetros preestabelecidos de eficiência e uniformidade, de acordo com o valor econômico da cultura. Pretende-se estabelecer nesse estudo uma associação destes parâmetros com os custos do sistema e com a

produtividade das culturas de modo a se conseguir a melhor relação custo/benefício do investimento.

Os objetivos deste estudo foram:

Desenvolver um programa computacional para simular e dimensionar sistemas de irrigação por aspersão convencional levando-se em conta a produtividade das culturas, a uniformidade de distribuição de água, e os custos do sistema.

Analisar o efeito da uniformidade de aplicação d'água no rendimento das culturas, e no custo do sistema, utilizando o modelo computacional desenvolvido.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

Diversos métodos de irrigação podem ser utilizados para o fornecimento de água às plantas, com a finalidade de proporcionar umidade adequada ao desenvolvimento das espécies vegetais. Dentre estes métodos, a irrigação por aspersão é um dos mais utilizados no mundo devido à diversidade dos equipamentos, uniformidade de distribuição e controle eficiente de aplicação da água e de erosão. O sistema caracteriza-se por uma chuva artificial relativamente intensa e uniforme sobre a área cultivada, de modo que a água infiltre no mesmo local onde cai. Em regiões onde a velocidade do vento e a temperatura são extremamente elevadas, a irrigação por aspersão apresenta elevada perda por evaporação e arrastamento pelo vento, não sendo portanto recomendada.

### **2.1. A aplicação de água pelo aspersor**

O jato de água ao sair do bocal do aspersor atinge velocidades acima de  $20 \text{ m s}^{-1}$  em relação ao ar que o circunda, criando uma zona de turbulência responsável pelo fracionamento do mesmo em gotas de diferentes tamanhos. As gotas formadas caem a uma determinada distância do aspersor, que é função do seu diâmetro e velocidade inicial do mesmo, do ângulo de trajetória do aspersor,

da declividade da superfície do solo e da velocidade do vento. O conjunto dessas variáveis, juntamente com o espaçamento entre aspersores, influencia diretamente na uniformidade de distribuição de água.

A aplicação uniforme da água na irrigação por aspersão depende do perfil de distribuição do aspersor, do espaçamento entre os aspersores e da velocidade e direção do vento (TARJUELO, 1995).

Existem vários parâmetros para se quantificar a uniformidade de distribuição de água na irrigação por aspersão. Um dos mais utilizados é o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen — CUC, definido por CHRISTIANSEN (1942), como:

$$CUC = \left(1 - \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n_c \bar{X}}\right) 100 \quad (01)$$

em que,

CUC = coeficiente de Uniformidade de Christiansen, %;

$X_i$  = precipitação no coletor de ordem  $i$ , mm ou ml;

$\bar{X}$  = média das precipitações nos coletores, mm ou ml; e

$n_c$  = número de coletores.

Valores baixos de CUC indicam uma combinação incorreta entre diâmetro de bocal, pressão de serviço e espaçamento do aspersor.

Utilizando o desvio padrão como a medida de dispersão, WILCOX e SWAILES (1947) propuseram o seguinte coeficiente, para expressar a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo.

$$CUE = 100 (1 - cv) \quad (02)$$

em que,

CUE = coeficiente de uniformidade estatística, %; e

cv = coeficiente de variação dos valores de precipitação, decimal.

HART (1961), assumindo que a distribuição da água do aspersor, regularmente espaçado, seja normal, definiu o seguinte coeficiente, expresso pela Equação 03:

$$CUH = 1 - \frac{0,798s}{\bar{X}} \quad (03)$$

em que,

CUH - Coeficiente de uniformidade de Hart, %; e

s - Desvio padrão da amostra.

Sabe-se que, no crescimento e desenvolvimento das plantas, tanto o excesso quanto a escassez de água são prejudiciais. Preocupados com este fato, CRIDDLE et al. (1956), recomendaram um parâmetro, para avaliação da uniformidade, conforme Equação 04.

$$CUD = \left( \frac{X^*}{\bar{X}} \right) 100 \quad (04)$$

em que,

CUD = coeficiente de uniformidade de distribuição, %; e

$X^*$  = lâmina média do menor quartil, mm.

Vários outros coeficientes, normalmente baseados em princípios estatísticos, foram desenvolvidos, com o objetivo de quantificar a uniformidade de aplicação de água, como o de BENAMI e HORE (1964) e o de KARMELI (1978).

ZOCOLER et al. (1995) relacionou o CUC com os custos da irrigação por aspersão, variando o espaçamento e mantendo constante a pressão de serviço do aspersor e o diâmetro de bocais, conforme a Equação (05).

$$CAT = 110,03 + 1,64 CUC \quad \text{para } 70,0\% < CUC \leq 96,0\%. \quad (05)$$

em que, CAT é o custo anual total, R\$.

KELLER e BLIESNER (1990) definem o coeficiente de uniformidade do sistema de irrigação ( $CUC_s$ ), em (%), como:

$$CUC_s = CUC \frac{1}{2} \left[ 1 + \left( \frac{P_n}{P_a} \right)^{0,5} \right] \quad (06)$$

e o coeficiente de uniformidade de distribuição do sistema,  $CUD_s$ , em %, como:

$$CUD_s = CUD \frac{1}{4} \left\{ 1 + 3 \left( \frac{P_n}{P_a} \right)^{0,5} \right\} \quad (07)$$

em que,

$P_n$  = Pressão mínima de operação do aspersor no sistema, em kPa; e

$P_a$  = Pressão média dos aspersores do sistema, em kPa.

Para KELLER e BLIESNER (1990) a relação entre CUC e CUD pode ser aproximada pelas seguintes equações:

$$CUC = 100 - 0,63 (100 - CUD) \quad (08)$$

$$CUD = 100 - 1,59 (100 - CUC) \quad (09)$$

O critério de se adotar um valor de CUC em torno de 80 % em projetos de irrigação por aspersão é amplamente aceito, embora seja sabido que o valor adotado devia ser função do valor comercial da cultura e da resposta desta a este parâmetro. No caso da quimigação, via sistema de aspersão, altos valores de CUC seriam desejáveis.

### 2.1.1. Perfil de distribuição do aspersor

O perfil de distribuição do aspersor é influenciado pelas características do próprio aspersor tais como: diâmetro do bocal, número e tipo de bocal, pressão de operação, velocidade e uniformidade de rotação, ângulo de trajetória do jato do aspersor e altura da haste do aspersor.

Para ARRUDA (1981) e PAZ (1990), o aumento da altura da haste do aspersor, dentro de certos limites, provoca melhoria na uniformidade de distribuição de água, porém, para condições de ventos fortes, o efeito pode ser contrário.

GOMIDE et al. (1980), trabalhando com alturas de haste do aspersor variando de 0,5 a 2 m de altura, concluíram que maiores coeficientes de uniformidade foram obtidos quando se usaram tubos de elevação mais altos e que o coeficiente de uniformidade foi mais influenciado pelo vento, à medida que se aumentou a altura do tubo de elevação.

SOARES et al. (1991) desenvolveram um modelo computacional para simular a precipitação de um aspersor, em diferentes condições operacionais, e verificaram que a uniformidade de distribuição de água aumenta quando o ângulo da haste do aspersor varia da posição vertical para a perpendicular.

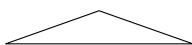
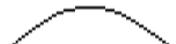
KELLER e BLIESNER (1990) apresentaram perfis típicos de precipitação de um aspersor operando isoladamente, juntamente com recomendações de espaçamentos, com base no seu diâmetro molhado efetivo, conforme Quadro 1. Para os autores acima mencionados, pode-se considerar que existem basicamente três tipos de perfil de distribuição, que são: o modelo elíptico (C) ou retangular (D), o modelo tipo rosquinha ou doughnut (E) e o modelo triangular (A e B).

Os bocais dos aspersores são orifícios para saída da água, co-responsáveis pela vazão, pulverização do jato, tamanho da gota e alcance do jato.

Para BERNARDO (1995), a distribuição da água varia com o tipo de aspersor e com o número e o tipo de bocais usados. Nos aspersores com dois bocais, o de maior diâmetro é responsável pelo maior alcance do jato, enquanto o de menor diâmetro, distribui a água mais próximo do aspersor.

TARJUELO et al. (1992) observaram que a uniformidade de distribuição da água é influenciada pelo número de bocais do aspersor. Em estudos com aspersores de média pressão, sob a ação do vento, maiores valores de CUC foram obtidos com aspersores com dois bocais.

Quadro 1 - Geometria dos perfis de precipitação de aspersores e espaçamentos recomendados em percentagem do diâmetro molhado efetivo (KELLER e BLIESNER, 1990)

Perfil do Aspersor		Espaçamentos Recomendados em Percentagem do Diâmetro Molhado Efetivo		
Tipo	Forma	Quadrado	Triângulo Equilátero	Retângulo Menor x Maior
<b>A</b>		50	50	40 x 60 a 65
<b>B</b>		55	66	40 x 60
<b>C</b>		60	65	40 x 60 a 65
<b>D</b>		40 - 70	70 a 75	40 x 70 a 75
<b>E</b>		40 - 80	80	40 x 80

O ângulo de inclinação e o diâmetro dos bocais também influenciam a uniformidade de aplicação de água. CARVALHO (1991) e ZOCOLER et al. (1995) observaram que, dependendo da pressão de operação e do espaçamento entre aspersores, o aumento do bocal propicia elevação do CUC. SOARES (1986) salienta que, em regiões de ventos fortes, deve-se selecionar os aspersores com menores ângulos de trajetória ( $22^{\circ}$  a  $25^{\circ}$ ) e menores espaçamentos, para minimizar as perdas por arrastamento e evaporação e melhorar a uniformidade de distribuição da água.

Velocidade de rotação do aspersor elevada provoca diminuição do raio de alcance do jato, sendo necessário menor espaçamento entre aspersores para garantir uma boa uniformidade. De acordo com KELLER e BLIESNER (1990), a velocidade de rotação ideal é de  $1,5 \text{ m s}^{-1}$  na região periférica da área molhada.

Vale salientar que, em virtude de inovações tecnológicas introduzidas nos materiais e equipamentos de irrigação por aspersão, atualmente, a velocidade de rotação dos aspersores pouco tem afetado a uniformidade de distribuição.

LI e KAWANO (1996), estudando a desuniformidade de rotação de aspersores, concluíram que o coeficiente de máximo desvio de rotação relativa, MRD, aumenta quando o ângulo da haste com a vertical aumenta, e que, na prática, os efeitos da desuniformidade da velocidade de rotação dos aspersores praticamente não influenciam no CUC dos aspersores.

Cada aspersor requer uma pressão de operação para que seu desempenho seja satisfatório, a qual influencia diretamente nas condições de vazão, velocidade inicial, trajetória e tamanho das gotas de água.

GOMIDE et al. (1980) observaram que, dentro de uma determinada faixa de pressão, a pressão de operação do aspersor não teve influência significativa sobre a uniformidade de distribuição de água. PAZ (1990) também não observou efeito significativo da pressão de operação do aspersor sobre a uniformidade de distribuição de água.

CARVALHO (1991), TARJUELO et al. (1992), VORIES e VON BERNUTH (1986) e ZOCOLER et al. (1995) verificaram aumentos do CUC com o aumento da pressão de operação.

Para CHARMELO (1990) e ZOCOLER et al. (1995), a partir de certo limite, o aumento da pressão de operação faz com que haja um menor diâmetro molhado, e que isso se deve ao fracionamento do jato de água em gotas menores.

Pressões excessivas reduzem a uniformidade de distribuição, por produzirem maior proporção de gotas pequenas, facilmente arrastadas pelo vento.

AZEVEDO (1998), trabalhando com pressão de operação do aspersor variando de 180 a 460 kPa, encontrou variação no CUC de 2,1%.

### **2.1.2. Espaçamento entre os aspersores**

A maioria dos aspersores aplica água sobre uma área circular, logo, é necessária uma determinada sobreposição das áreas molhadas por aspersores adjacentes para garantir uma boa uniformidade de aplicação de água. O espaçamento entre os aspersores determina a interação entre os círculos molhados por aspersores contíguos. Geralmente, quando o espaçamento entre aspersores aumenta, a uniformidade de distribuição diminui.

Normalmente, os aspersores são dispostos no campo nas formas de retângulo, quadrado e triângulo equilátero, sendo as duas primeiras, as mais comuns (BERNARDO, 1995). O grau da sobreposição requerida depende do perfil de precipitação do aspersor, da velocidade e da direção do vento, da pressão de operação do aspersor e da uniformidade de distribuição desejada.

HEERMANN e KOHL (1980) recomendam distâncias de 60% do diâmetro efetivo do aspersor para disposições quadradas ou triangulares e de 40 a 75% para disposições retangulares, em condições de vento com velocidade inferior a  $2 \text{ m s}^{-1}$ . Os autores definem como diâmetro efetivo, 95% do diâmetro molhado pelo aspersor com dois bocais e 90% do diâmetro molhado pelo aspersor com um bocal.

### **2.1.3. Velocidade e direção do vento**

O vento é um elemento limitante na irrigação por aspersão. A ação do vento sobre o perfil de distribuição de água é fundamental. Vários pesquisadores (ALVES e CASTRO, 1995; COSTA e CASTRO, 1993; NOGUEIRA e SOUZA, 1987; PAIR et al., 1969, PAZ, 1990) demonstraram que a uniformidade de aplicação de água é afetada pela velocidade do vento, pois o vento provoca mudança no perfil de distribuição do aspersor e arrasta mais as gotas de menor diâmetro. Geralmente, quanto maior a velocidade do vento, menor o valor do CUC.

PAZ (1990) observou que o coeficiente de uniformidade de Christiansen, CUC, apresentou, para o espaçamento de 12 x 18 m, valores ligeiramente superiores em comparação com os valores para o espaçamento de 12 x 12 m, quando a velocidade média do vento era inferior a  $3 \text{ m s}^{-1}$ .

O efeito do vento torna-se menos significativo quando o espaçamento entre aspersores diminui (BERNARDO, 1995; CHRISTIANSEN, 1942; GOMIDE, 1978; KELLER e BLIESNER, 1990; PAIR, 1968; PAZ, 1990). No Quadro 2 há uma recomendação geral para espaçamento dos aspersores em função do diâmetro de cobertura e da intensidade da velocidade do vento.

A velocidade do vento aumenta com a altura em relação à superfície do solo, logo, quanto mais alto o jato atingir, maior a influência do vento. Portanto, recomenda-se trabalhar com aspersores no máximo 0,2 m acima da altura da cultura adulta e com ângulo de trajetória entre  $25^\circ$  e  $27^\circ$ , ao invés de  $35^\circ$ , que seria o ângulo que proporcionaria um maior alcance e também uma maior altura das gotas de água durante a trajetória (SOARES, 1986; TARJUELO, 1995).

Segundo ALVES e CASTRO (1995) e TARJUELO e MARTINEZ (1993), o vento é a variável que mais influencia na uniformidade de distribuição de água. A velocidade do vento exerce um papel fundamental nas perdas por evaporação e arraste. Os mesmos autores afirmaram que a uniformidade de distribuição diminuiu 20 % quando a velocidade do vento passou de valores menores que  $2 \text{ m s}^{-1}$  a valores superiores a  $4 \text{ m s}^{-1}$ , o que permite recomendar a interrupção da irrigação nas condições de ventos fortes. Tal efeito é reduzido em pivô central, em razão de o espaçamento entre aspersores ser menor.

Sob condições de vento, a uniformidade de distribuição melhora com o aumento do tempo de irrigação, em razão da variação da direção e intensidade do vento com o tempo (SEGINER, 1969).

A ação do vento afeta a uniformidade de distribuição da água pelo aspersor, cuja distorção dependerá de sua velocidade e do tamanho das gotas de água. Quanto maior a velocidade do vento e menor o tamanho das gotas, maior será a distorção na distribuição da água, em comparação com aquela para

condições de vento fraco (BERNARDO, 1995; GOMIDE, 1978; OLITTA, 1986; SOLOMON et al., 1985).

SHULL e DYLLA (1976), observando os efeitos da velocidade do vento sobre a distribuição de água, em um aspersor de alta pressão, concluíram que o aumento da velocidade do vento aumentou o alcance do jato no sentido do vento, encurtou-o no sentido contrário e estreitou o alcance no sentido normal à direção do vento, provocando uma diminuição do diâmetro molhado.

Estudos mostram que a influência da direção do vento é pequena e também contraditória. SOARES (1998) e muitos outros autores afirmam que, em regiões com ventos, a linha lateral do sistema de aspersão deve ser localizada na direção perpendicular ao vento dominante.

MOYNAHAN (1972) verificou não existir orientação única da linha lateral em relação à direção do vento, que possa resultar em maior CUC.

Quadro 2 - Espaçamento dos aspersores em função do diâmetro de cobertura e da intensidade da velocidade do vento

Velocidade do Vento ( m s <sup>-1</sup> )	Espaçamento em Função do Diâmetro de Cobertura (%)
0	65 a 70
0 a 2,0	55 a 65
2,0 a 4,0	45 a 55
> 4,0	30 a 45

Fonte: BERNARDO (1995)

VORIES e VON BERNUTH (1986), no entanto, constataram que o melhor posicionamento da linha lateral é o paralelo à direção do vento. TARJUELO et al. (1999) afirmaram que, em espaçamentos quadrados, a direção do vento tem pequena influência sobre a uniformidade de distribuição de água do aspersor. VORIES e VON BERNUTH (1986) constataram que, em espaçamentos de 12 x 18 m, a influência da direção do vento é mais significativa.

Para NOGUEIRA e SOUZA (1987), a direção do vento apresenta efeito quase nulo sobre a uniformidade.

CLARK e FINLEY (1975) verificaram que o déficit de pressão de vapor está altamente correlacionado com as perdas de água na irrigação por aspersão, principalmente em velocidades de vento maiores que  $4,5 \text{ m s}^{-1}$ .

Devido a grande influência do vento sobre a uniformidade de irrigação, é interessante dispor-se de modelos de simulação da irrigação que levem em conta a ação do vento e que sirvam de ajuda à tomada de decisões no dimensionamento de sistemas de irrigação por aspersão ( PEREIRA, 1995; SEGINER; et al., 1991; TARJUELO et al., 1994; VORIES, et al., 1987).

Como resultado do processo de aplicação de água pelo aspersor, pode-se avaliar (TARJUELO, 1995):

1) o escoamento superficial, se a relação entre a intensidade de aplicação de água, pluviometria do sistema, e a capacidade de infiltração da água no solo for maior que 1;

2) a possível deformação da superfície do solo pelo impacto das gotas, se estas são grandes; e sua repercussão na infiltração de água no solo, devido ao selamento superficial, formação de crosta ou erosão;

3) a uniformidade de distribuição da água na superfície do solo e sua grande dependência da ação do vento, em intensidade e duração;

4) a redistribuição da água dentro do perfil do solo, por diferença de potencial da água no solo a distâncias entre 1 e 3 m, que melhora sensivelmente a uniformidade real da água no solo depois da irrigação.

HART (1972), LI e KAWANO (1996), PAIVA (1980) e REZENDE (1992) realizaram trabalhos, em campo e em laboratório, visando avaliar a capacidade de redistribuição de água pelo solo, partindo de diferentes uniformidades de distribuição e concluíram que elevados valores dos coeficientes de uniformidade de distribuição de água, abaixo da superfície do solo, em pequenos espaços de tempo, foram encontrados, mesmo quando a uniformidade da água aplicada na superfície do solo foi baixa, em diferentes classes de solo.

## 2.2. Distribuição de gotas por tamanho

O diâmetro das gotas de água, na irrigação por aspersão, influencia diretamente a perda por evaporação e arraste pelo vento, o perfil de distribuição do aspersor e a taxa de infiltração da água devido ao impacto da gota no solo.

SOLOMON et al. (1985) desenvolveram e avaliaram um modelo de regressão para prever o limite superior da função de distribuição log-normal em função do tipo, do diâmetro e da pressão do bocal de aspersores fixos. O modelo utilizou dois tipos de bocais, e foi usado para verificar a influência da pressão e do diâmetro do bocal sobre a distribuição do tamanho de gotas.

CARVALHO (1991) observou que o diâmetro médio de gotas de aspersores de média pressão é função direta do diâmetro do bocal, para uma mesma pressão de operação do aspersor.

EDLING (1985) verificou um decréscimo na perda por evaporação com o aumento do diâmetro das gotas. Resultado similar foi obtido por PEREIRA et al. (1997), que observaram que quanto menor o diâmetro da gota, maior a percentagem de perda de água por evaporação.

O jato de água, proveniente de aspersores de impacto, fraciona-se em gotas devido a diferença de velocidade entre o jato e o ar que o circunda, ou devido à ação do braço oscilante. Estima-se que o braço oscilante intercepta, em média, de 10 a 15 % da descarga total, e que a velocidade inicial da água interceptada pelo braço oscilante é 70 % do jato inalterado. Na realidade, existe pouca informação na literatura quantificando a fração de água desviada e a energia absorvida pelo braço oscilante (VON BERNUTH e GILLEY, 1984).

Engenheiros das indústrias de aspersores acreditam que, em aspersores médios, 15 % da vazão total é desviada e 50 % da energia cinética da água é transferida para o braço do aspersor. A ação do braço oscilante causa o movimento de rotação do aspersor, o aumento da quantidade de água que cai próxima ao aspersor e o decréscimo da quantidade de água depositada no ponto de máxima acumulação de água ao longo do perfil, em razão da regular interrupção do jato de água (BILANSKI e KIDDER, 1958).

COELHO (1990) e COELHO e FOLEGATTI (1998) demonstraram que, em função da tensão da mola do braço oscilante, do diâmetro do bocal e da pressão de operação, pode-se ter de 4 a 40 % do jato interceptado pelo defletor, o que provoca uma redução na energia do mesmo de 35 a 55 %. Afirmaram que até o presente momento, não existe orientação normativa quanto ao grau de tensão da mola acoplada ao braço oscilante, o que deixa algumas incertezas no processo de preparo dos aspersores para ensaios laboratoriais e de campo.

FISCHER e WALLENDER (1988) estudaram a influência do tamanho do coletor e do tempo de duração dos ensaios, nos valores dos coeficientes de uniformidade empregando, para tanto, um sistema de leitura automatizado. Foram comparados os resultados obtidos com coletores de diâmetros internos de 0,4, 0,235 e 0,127 m e duração dos testes variando entre 5 minutos e 2 horas. Nos testes realizados com um aspersor rotativo do tipo impacto, bocal 3,2 mm e pressão de 276 kPa, observaram maior variabilidade de precipitações nos coletores situados próximos ao aspersor e no final do raio de alcance, levantando-se a hipótese de que o impacto do defletor-martelo, desviando água nas proximidades do emissor, aumentou o coeficiente de variação nas referidas regiões. O coeficiente de variação do volume de água coletado diminuiu, a medida que a duração do teste e o diâmetro dos coletores aumentaram.

SAMPAIO (1997), estudando os efeitos da pressão, do braço defletor e do raio de alcance, no diâmetro médio de gotas do aspersor Tigre modelo 4023-2-3/4, encontrou que o diâmetro médio das gotas diminuiu com o aumento da pressão e a redução do raio de alcance, independente do braço defletor. O braço defletor apresentou uma tendência de produzir um maior diâmetro médio de gotas, apenas para os menores valores de pressão e do raio de alcance.

Segundo GARCIA (1986), as precipitações pluviométricas normalmente produzem gotas cujos diâmetros variam de 0,5 a 1 mm, ao passo que as tempestades superam os 3 mm. Para OLITTA (1986), gotas maiores que 4 mm prejudicam as folhas delicadas das plantas e provocam a formação de crostas em solos argilosos.

O conhecimento da distribuição de gotas, por tamanho, que caem no solo, na irrigação por aspersão, tem importância prática no desenvolvimento de modelos computacionais que simulam a irrigação por aspersão. TARJUELO (1995) destaca que: a) as gotas pequenas são facilmente arrastadas pelo vento, provocando distorção na distribuição de água, aumentando as perdas por evaporação e arraste pelo vento; b) as gotas grandes tem grande energia cinética, a qual é transferida à superfície do solo, podendo desagregar o solo e afetar a capacidade de infiltração ou a formação de crosta; c) o conhecimento da distribuição dos tamanhos de gota permite, hoje em dia, dispor de uma aproximação do comportamento de um sistema de irrigação, mediante o desenvolvimento de simulações da irrigação por aspersão (SEGINER et al., 1991; VORIES et al., 1987).

Para KOHL (1974), a distribuição de gotas, por tamanho, para os aspersores é importante, pois as gotas pequenas estão mais sujeitas ao transporte pelo vento, ocasionando perdas por arrastamento. Já as gotas maiores, por possuírem maior energia cinética, podem causar escoamento superficial devido ao encrostamento da superfície do solo, e prejuízos às plantas por afetar a polinização e a fixação de botões florais (SCALOPPI, 1986;. HILLS e GU, 1989).

MERRINGTON e RICHARDSON (1947), mostraram que o tamanho das gotas, formadas a partir da dispersão do jato de água, é inversamente proporcional à velocidade do jato em relação ao ar que o circunda. Desse modo, gotas pequenas são formadas próximo à periferia do jato, devido a uma maior diferença de velocidade em relação ao ar. Por outro lado, a água próxima ao centro do jato, por apresentar menor diferença de velocidade em relação ao ar, resulta na formação de gotas maiores. Considerando que a velocidade das gotas de menor diâmetro decresce mais rapidamente do que as de maior diâmetro, aquelas tendem a cair mais próximo do aspersor. Por sua vez, as gotas de maior diâmetro tendem a cair mais distante do aspersor.

A Figura 1 representa a distribuição de gotas, por tamanho, que são produzidas durante a desintegração do jato, a intervalos de 2 m a partir do aspersor, de diâmetro do bocal 3,97 mm, operando a uma pressão de 400 kPa

(KOHL, 1974). Observa-se que, a uma determinada distância do aspersor, caem distintos tamanhos de gotas, aumentando a diferença entre estes quanto mais se afasta do aspersor. Os fatores mais importantes na distribuição do tamanho de gotas são a pressão de serviço e o diâmetros dos bocais dos aspersores.

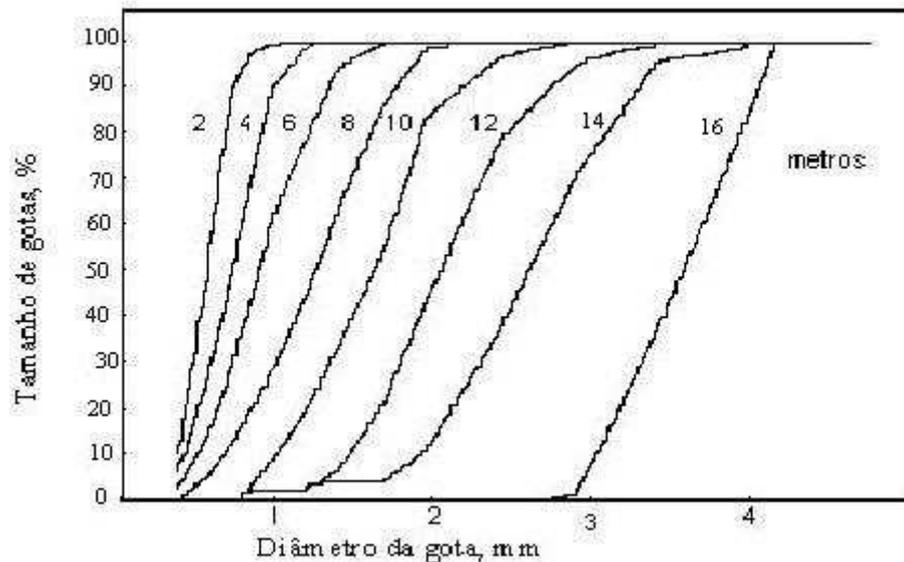


Figura 1 - Distribuição de gotas por tamanho produzidas durante a desintegração do jato, a intervalos de 2 m a partir do aspersor (KOHL, 1974).

## 2.3. Medidas e predições da distribuição da água

### 2.3.1. Coeficiente de uniformidade

A uniformidade de distribuição de água na irrigação é um importante parâmetro de projeto que afeta a produção da cultura, a eficiência do uso da água e a lixiviação de fertilizantes. No campo, é um dos principais fatores que caracterizam o funcionamento do sistema de irrigação. O teste de uniformidade pode ser feito colocando-se uma malha de coletores em torno de um aspersor isolado, ou de um aspersor representativo de uma linha lateral, e operá-lo por duas horas, sob as condições desejadas. Os dados de precipitação obtidos, quando se utiliza somente um aspersor, são sobrepostos por meio de simulação,

conforme os espaçamentos desejados entre aspersores e entre laterais. No caso do teste com uma linha lateral trabalhando diretamente no campo, o espaçamento entre aspersores é fixo, entretanto pode-se simular diferentes espaçamentos entre laterais (SOARES, 1998).

É usual expressar a uniformidade de distribuição de água em uma área entre aspersores por um coeficiente de uniformidade. Este coeficiente expressa a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo, por meio de medidas de dispersão, expressas na forma adimensional, pela comparação com o valor médio (FRIZZONE, 1992).

Na realização do teste de uniformidade deve-se registrar, dentre outros, os dados relativos à identificação e descrição do aspersor, como: marca, modelo, número e diâmetro de bocais; e os dados de ensaio, como: altura do aspersor (m), altura do coletor (m), duração do teste (min), pressão no bocal principal e na base do aspersor (kPa), vazão média ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ), velocidade do vento ( $\text{km h}^{-1}$ ), direção do vento, umidade relativa, início e término de realização do teste (ABNT, 1985).

MERRIAM et al. (1983) afirmam que 20 coletores espaçados de 3 m entre si seriam necessários para uma razoável precisão do teste, que deveria ser longo o suficiente para que se captasse no mínimo 10 mm de lâmina nos coletores. Entretanto, afirmam que erros de até 3 % devem ser esperados.

A ASAE (1984) normatiza o teste de uniformidade com o uso de oitenta coletores instalados de maneira a formar com suas bordas um plano visualmente horizontal. O vento deve ser nulo ou fraco durante o teste.

A ABNT (1985) normatiza o teste de uniformidade de modo que o aspersor fique localizado no centro geométrico do reticulado de coletores, equidistante de quatro coletores adjacentes. A área mínima de captação de coletores é de  $50 \text{ cm}^2$ . Os coletores devem ser instalados seguindo uma disposição quadricular e no mínimo 50 coletores deverão receber água durante o ensaio. O terreno deve estar preferencialmente em nível, ou apresentar uma declividade uniforme e pequena.

DAVIS (1966) apresentou uma análise dos parâmetros que descrevem a uniformidade de distribuição de água dos aspersores em relação à densidade de

coletores. O procedimento constou da coleta de dados para as análises de um sistema, empregando 4 linhas laterais de 76,2 mm de diâmetro, espaçadas de 15 m, operando simultaneamente. Ao longo de cada lateral, usou 8 aspersores rotativos, com diâmetro de bocal de 4,36 mm, espaçados de 9 m e instalados em tubos de elevação de 0,45 m de altura. Selecionou uma área central retangular, denominada área padrão, de 9 x 15 m, para coletar amostras de água dos aspersores circundantes. Colocou na área padrão 375 coletores, numa malha de 0,6 x 0,6 m. Foram então avaliados padrões de distribuição para várias densidades de coletores. Foram analisados em malhas quadradas de 0,6, 1,5, 1,8 e 3,0 m de lado. Para todos os padrões, a lâmina média de água aplicada foi praticamente a mesma, para todas as densidades de coletores. Concluiu que, para sistemas de irrigação que distribuem água desuniformemente, densidades de coletores de 0,25 a 6,67 % da área padrão, não apresentaram efeito sobre a lâmina média aplicada.

LI e KAVANO (1996) associaram o CUC com o desvio máximo de rotação do aspersor, MRD, e concluíram que o CUC diminui com o aumento do MRD, porém este decréscimo foi menor que 3 % quando os tubos de elevação do aspersor foram instalados verticalmente.

Segundo VON BERNUTH (1983), a definição de um valor desejável de uniformidade só é válida se o uso da água é livre. Caso contrário, a uniformidade deixaria de ser um critério e passaria a ser um parâmetro de projeto e seu valor estaria em função dos custos e expectativas de receita.

FUKUI et al. (1980) apresentaram um método para avaliar a taxa de aplicação de água e o coeficiente de uniformidade de Christiansen na irrigação por aspersão, para condições reais de campo, incluindo perdas por arraste pelo vento.

HAN et al. (1994) utilizaram duas abordagens: uma física, outra experimental e propuseram um modelo matemático para representar o perfil de distribuição do aspersor, para condições de vento. O modelo utilizou uma elipse para representar a forma base da distribuição e funções de forma para representar a distribuição de água.

### 2.3.2. Estimativa da distribuição da água

Com o objetivo de obter a distribuição do tamanho de gotas, sem realização de testes que utilizam equipamentos sofisticados e caros, pesquisadores como FUKUI et al. (1980), PEREIRA (1995), SEGINER et al. (1991), SOARES (1986), VON BERNUTH e GILEY (1984) e TARJUELO et al. (1994) desenvolveram modelos para estimativa da distribuição de gotas, aplicando a teoria balística à trajetória da gota no ar. Esta teoria, baseada no Princípio Fundamental da Dinâmica, permite o conhecimento do diâmetro da gota que cai, a cada distância específica do aspersor, pela resolução das equações diferenciais do movimento da gota no ar, Equações 10, 11 e 12, as quais caracterizam a trajetória de uma gota ao deixar o bocal do aspersor, utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -R \cos\theta \cos\gamma \quad (10)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -R \cos\theta \sin\gamma \quad (11)$$

$$m \frac{d^2z}{dt^2} = -mg - R \sin\theta \quad (12)$$

$$R = m a_a \quad (13)$$

$$a_a = c_n v^n, \quad n = 2 \quad (14)$$

em que,

R = Força de resistência da gota ao ar, N;

$a_a$  = aceleração de arrastamento,  $m s^{-2}$ ;

m = massa da gota, kg;

$c_n$  = coeficiente de arrastamento, que depende de n;

V = velocidade da gota,  $m s^{-1}$ .

n = expoente de velocidade, constante positiva, adimensional.

x, y, z = coordenadas cartesianas de posição da gota, m;

g = aceleração da gravidade,  $m s^{-2}$ ;

$t$  = tempo percorrido pela gota, s;

$\theta$  = ângulo da trajetória da gota com a horizontal, radiano; e

$\gamma$  = ângulo entre a projeção da trajetória no plano XY e o eixo positivo de X, radiano.

VON BERNUTH (1988) desenvolveu um modelo computacional, WINDMOD, baseado na teoria balística, para simular a trajetória de diferentes diâmetros de gota, em condições de ambiente fechado, isto é, sem vento.

A Figura 2 representa a comparação entre os dados da relação do tamanho médio da gota e a distância do aspersor, obtidos pelo modelo WINDMOD, com os dados medidos com equipamentos a laser. Analisando a figura, observa-se que, com exceção da zona central, houve um bom ajuste dos dados, sobretudo na zona onde chegam as gotas de maior diâmetro, procedentes do choque do braço com o jato.

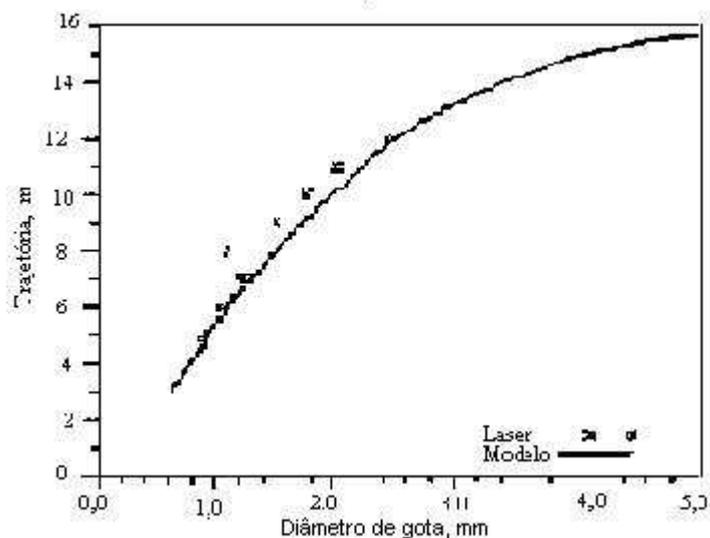


Figura 2 - Diâmetro médio de gotas em relação à distância do aspersor, simulado com o modelo e medido com equipamentos a laser, na ausência de ventos.

O jato de água, ao sair do bocal, começa a ser fracionado em gotas individuais, as quais podem ser tratadas como projéteis. O movimento de cada gota é influenciado por sua velocidade inicial, pela aceleração da gravidade e pela força de arrastamento aerodinâmica (VORIES et al., 1987; VORIES e VON BERNUTH, 1985).

A velocidade da água, ao sair do bocal do aspersor, pode ser estimada por:

$$V_i = C \sqrt{2gPS} \quad (15)$$

em que,

$V_i$  = velocidade inicial do jato,  $m s^{-1}$ ;

$C$  = coeficiente de descarga do aspersor, adimensional;

$g$  = aceleração da gravidade,  $m s^{-2}$ ; e

$PS$  = carga de pressão do aspersor, mca.

A Figura 3 representa um diagrama bidimensional de uma gota de água movendo-se no ar e as forças que nela atuam.

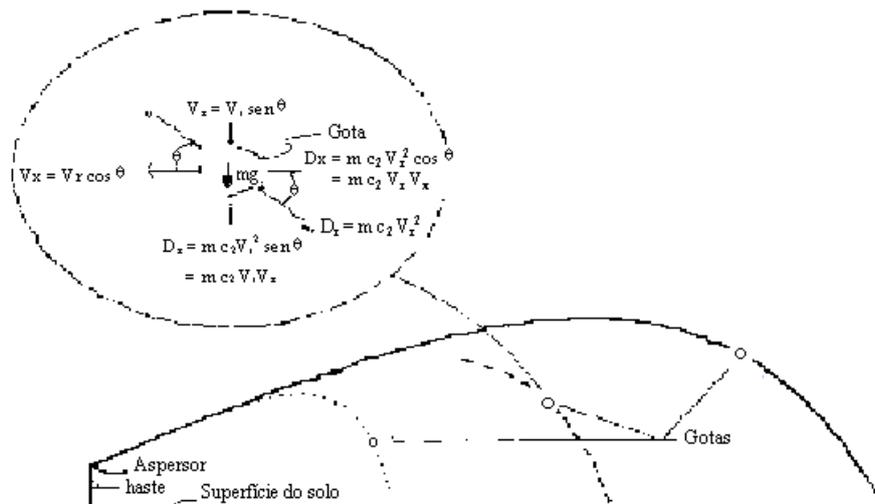


Figura 3. Diagrama bidimensional das forças que agem sobre uma gota durante sua trajetória (VORIES et al., 1987).

SEGINER (1965) e VON BERNUTH e GILLEY (1984) propuseram que a aceleração de arrastamento que afeta a velocidade da gota pode ser aproximada pela Equação 16, concluindo que o valor de  $n$  igual a 2 apresentou o melhor resultado. Obtiveram os valores de  $c_2$  (Figura 4) para tamanhos de gota variando de 1,5 a 6 mm, usando os resultados encontrados por LAWS (1941), GREEN (1952) e LIST (1966). Eles resolveram as equações de movimento das gotas provenientes do aspersor, mediante o emprego do método de Runge- Kutta de quarta ordem.

SEGINER (1965), baseado na segunda Lei do movimento, escreveu a equação da força de arrastamento aerodinâmica que age sobre a gota caindo verticalmente, Equação 16;

$$g - \frac{dv}{dt} = c_n v_n \quad (16)$$

e considerando que a gota de água é simétrica em relação ao seu eixo de movimento, escreveu a equação do movimento para uma gota que sai do aspersor, Equação 17.

$$F_d = mc_2 v^2 = C_d \rho A \frac{v^2}{2} \quad (17)$$

em que,

$F_d$  = força de arrastamento, N;

$C_a$  = coeficiente de arrastamento, adimensional;

$\rho$  = massa específica do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ; e

$A$  = área projetada da gota,  $\text{m}^2$ .

FUKUI et al. (1980) usaram as seguintes equações para estimar os valores de  $C_a$ :

$$C_a = \frac{33,3}{N_{Re}} - 0,0033N_{Re} + 1,2, \quad \text{para } N_{Re} < 100 \quad (18a)$$

$$C_a = \frac{72,2}{N_{Re}} - 0,0000556N_{Re} + 0,48, \quad \text{para } 100 \leq N_{Re} \leq 1000 \quad (18b)$$

$$C_a = 0,45, \quad \text{para } N_{Re} > 1000 \quad (18c)$$

em que,  $N_{Re}$  é o Número de Reynolds, adimensional.

FUKUI et al. (1980) utilizaram o método de Runge-Kutta de quarta ordem, para resolver as equações do movimento de gotas provenientes do aspersor. O modelo usa o perfil de precipitação de água do aspersor, com seus parâmetros operacionais sob condições de ausência de vento, como também resolve as equações de movimento para 10 diâmetros de gotas e 10 ângulos horizontais, variando de 0 a 180°, em intervalos de 22,5°. Com isso, 100 posições de lâminas de água são obtidas, para uma parte simétrica da área molhada. A lâmina de água em um ponto específico é determinada pela interpolação de pontos conhecidos ao redor.

Para LI e KAWANO (1995), a abordagem convencional para a determinação do coeficiente de arrastamento, na teoria balística ajusta bem o movimento da gota d'água emitida por aspersores de bocais circulares. Porém, em testes realizados com aspersores com um bocal quadrado e aspersores com dois bocais retangulares, verificaram que a abordagem convencional não ajustou bem os dados para estes aspersores. Daí, introduziram um coeficiente aparente de arrastamento, e uma nova maneira de cálculo do  $C_a$  foi desenvolvida.

TARJUELO et al. (1992) utilizaram metodologia semelhante à de FUKUI et al. (1980), porém com a introdução de um fator de correção no coeficiente de arrastamento  $C_a$ , para simular a distribuição de água de um aspersor. Utilizando gotas com diâmetros variando de 0,2 a 6,5 mm, concluíram que o modelo proporcionou uma aproximação do valor medido, que pode ser considerada como aceitável para as condições ensaiadas. Entretanto, é preciso seguir avaliando outros aspersores, bocais e pressões de serviço, para comprovar sua validade geral e aumentar seu nível de precisão, em algumas situações.

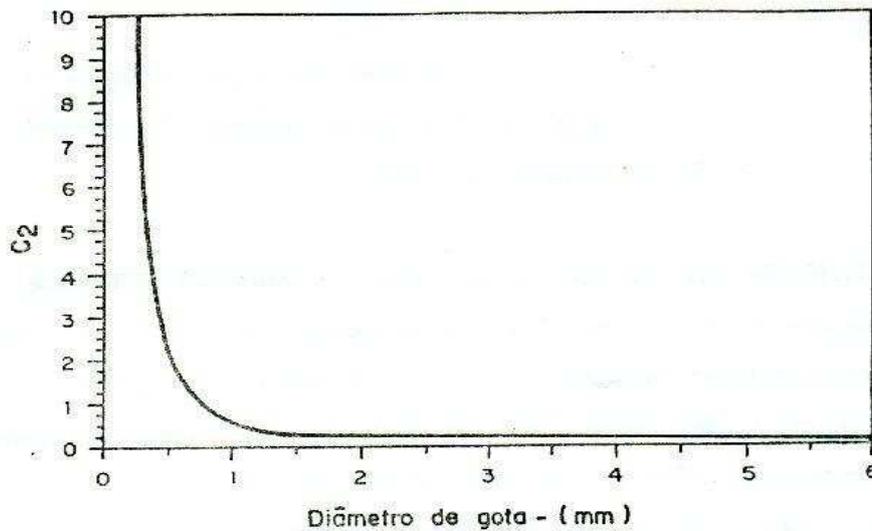


Figura 4 - Coeficiente  $c_2$ , ou de Seginer, em função do diâmetro da gota, mm.

SOARES (1986) usou valores de  $c_2$ , obtidos por VON BERNUTH e GILLEY (1984), e o modelo de trajetória balística, para simular as lâminas de água coletadas em uma malha de pontos dispostos em torno do aspersor. Seu propósito principal foi desenvolver um modelo computacional para simular dados de precipitação do aspersor, operando em diferentes declividades da superfície do solo, ângulos de inclinação do bocal e ângulos do tubo de elevação do aspersor com a vertical, a partir de dados de precipitação deste mesmo aspersor, trabalhando em um plano em nível, na ausência do vento. O autor assumiu que a perda de água por evaporação durante a trajetória da gota, era desprezível e o diâmetro da gota permanecia constante ao longo da trajetória, o que foi comprovado por PEREIRA (1995). As equações de movimento, em três dimensões, foram resolvidas para tamanhos de gotas variando de 0,25 a 6 mm de diâmetro, com incrementos de 0,25 mm, utilizando também o método de Runge-Kutta de quarta ordem. Concluiu que o modelo mostrou-se razoavelmente eficiente, quando foram comparados os dados simulados com os obtidos em campo; a uniformidade de distribuição sofreu menor influência da declividade da superfície do solo quando trabalhou com maiores ângulos de inclinação do bocal; e o tubo de elevação deve ser mantido sempre perpendicular à superfície do solo,

para maximizar a uniformidade de distribuição e minimizar o potencial de escoamento superficial.

#### **2.4. Produtividade da cultura**

O conhecimento da resposta dos cultivos ao regime de irrigação é fundamental para a otimização econômica do uso da água. A produção das culturas, em relação à água aplicada, depende de fatores como: método de aplicação de água, turno de rega, lâmina aplicada por irrigação, condições climáticas, variabilidade do solo, variedade e estágio de crescimento da cultura. Para HARGREAVES (1975), o conteúdo de umidade do solo, dentre os vários fatores que influenciam o nível de produção das culturas, é um dos mais importantes.

Função de resposta, função de produção, relação fator-produto são termos que relacionam a quantidade de produção e as quantidades de investimento necessárias para obtê-la (THOMPSON, 1973). O conceito de função de produção baseia-se na teoria que o grau de depleção de umidade do solo afeta o crescimento e a produtividade dos cultivos.

Na agricultura irrigada, o fator água deve ser otimizado, possibilitando, sem maiores riscos, aumentar a utilização dos demais insumos de produção e, conseqüentemente, a obtenção de maiores produtividades com uma melhor combinação dos insumos empregados. Para tanto, o conhecimento das funções de produção, ou superfícies de resposta, é fundamental para a tomada de decisão, haja vista, que estas funções possibilitam a determinação das interações entre os fatores que afetam a produtividade, bem como a escolha de soluções mais condizentes com a realidade regional, permitindo assim, o manejo racional da irrigação, apoiado em bases técnicas e economicamente viáveis (BERNARDO, 1998).

Para LANZER e PARIS (1980), a utilização de função de produção para determinar os níveis ótimos econômicos dos fatores é o principal ponto crítico da

pesquisa. Para OLIVEIRA (1993), as recomendações genéricas que objetivam a produtividade física máxima não apresentam qualquer preocupação com a economicidade, e a utilização da irrigação, com base nessas informações, poderá torná-la inviável, do ponto de vista econômico.

De acordo com MANTOVANI (1993), as funções de produção, em relação à água, analisam a produção total de matéria seca, ou da parte colhida da cultura, frente à transpiração, evapotranspiração ou quantidade de água aplicada por irrigação. Dentre os autores que analisaram os efeitos da quantidade de água aplicada por irrigação sobre a produção, citam-se: BERNARDO, (1998), FRIZZONE (1993), OLIVEIRA (1993) e PAZ (1995).

De acordo com FRIZZONE (1993), a lâmina de água aplicada por um sistema de irrigação por aspersão pode ser representada pelo seguinte polinômio:

$$Y = A_1 + B_1 L + C_1 L^2 \quad (19)$$

em que,

$Y$  = produtividade da cultura, t ou  $\text{kg ha}^{-1}$ ;

$L$  = lâmina total de água aplicada, mm; e

$A_1, B_1, C_1$  = parâmetros de ajuste da equação, adimensional.

A partir da Equação 19, pode-se calcular a lâmina total de irrigação  $L_{\text{máx}}$  necessária para maximizar a produção, conforme:

$$\frac{\partial Y(L)}{\partial L} = B_1 + 2C_1 L = 0 \quad (20)$$

$$L_{\text{máx}} = -\frac{B_1}{2C_1} \quad (21)$$

Quando se trabalha com a evapotranspiração,  $ET$ , em geral, usa-se o modelo linear de forma:

$$Y = A_1 + B_1 ET \quad (22)$$

LETEY et al. (1984) desenvolveram um método, baseado em análises empíricas, que relaciona as implicações da não uniformidade da taxa de infiltração sobre os níveis ótimos de aplicação da água de irrigação, produção e lucro nas culturas de milho, *Zea mays*, L. e algodão, *Gossypium hirsutum*, L.

MANTOVANI et al. (1995) estabeleceram relações entre evapotranspiração, lâmina e uniformidade de irrigação para obter um modelo válido para a relação produtividade da cultura versus lâmina de irrigação, e desenvolveram um modelo que quantifica o impacto de uma lâmina deficitária de irrigação, na produção dos cultivos, conforme Equação 23.

$$1 - \frac{Y_r}{Y_{mp}} = k_y \quad C_d \quad (1 - p) \quad (23)$$

em que,

$Y_r$  = produtividade real da cultura,  $\text{kg ha}^{-1}$  ;

$Y_{mp}$  = produtividade máxima da cultura,  $\text{kg ha}^{-1}$  ;

$k_y$  = coeficiente de resposta da cultura;

$C_d$  = coeficiente de déficit; adimensional, e

$p$  = total das fontes de água para a cultura, exceto a de irrigação,

$0 \leq p \leq 1$ , adimensional.

#### **2.4.1. Coeficiente de déficit.**

O coeficiente de déficit ( $C_d$ ) é definido como a razão entre a lâmina média correspondente à fração da área que recebeu menos água que a requerida e a lâmina requerida para a irrigação da área. Ou seja, é igual à relação entre a lâmina que irriga deficitariamente a superfície do solo ( $LD$ ), em mm, e a lâmina líquida requerida pela cultura ( $LR$ ), em mm. Está relacionado com o manejo da irrigação, levando em conta quanto da demanda hídrica da cultura está sendo

reposta pela irrigação. É um dos mais importantes parâmetro para avaliação do desempenho de sistemas de irrigação (LOSADA et al. 1990).

A produção máxima só pode ser alcançada se Cd for igual a zero, pois este quantifica o déficit de água a que está submetida uma área da superfície irrigada.

Para a irrigação por aspersão, assumindo uma distribuição uniforme de lâmina de água aplicada, conforme apresentado na Figura 5:

$$Cd = [(1 - Zi)/2] [1 - ((LB/LR) (2 CUC - 1))] \quad (24)$$

$$Zi = [1/(4 - 4 CUC)] [3 - 2 CUC - (LR/LB)] \quad (25)$$

$$CUC = 1 - \frac{L_{\text{máx}} - L_B}{2L_B}, \text{ (considerando que 50\% da área está} \quad (26)$$

adequadamente irrigada)

em que,

LB = lâmina média total coletada, ( mm ); e

Lmáx = lâmina máxima de irrigação aplicada, em mm.

Observa-se na Figura 5, que quando a lâmina média total aplicada ( $L_B$ ) for menor do que a lâmina líquida requerida LR, então:

$$Cd = \frac{L_R - L_B}{L_R} \quad (27)$$

$$\text{pois : } C_d = \frac{L_D}{L_R} \quad (28)$$

$$\text{e, } L_D = L_R - L_B \quad (29)$$

Observa-se ainda na Figura 5, que  $LR = LL + LD$ , em que, LL é a lâmina útil aplicada. Assumindo-se eficiência de aplicação, Ea, como o quociente entre a lâmina útil aplicada (LL) e a lâmina média total aplicada (LB), pode-se escrever que:

$$Cd = 1 - Ea \frac{L_B}{L_R} \quad (30)$$

Generalizando para todas as irrigações durante o ciclo da cultura, a expressão anterior pode ser escrita da seguinte forma:

$$C_{dm} = 1 - E_{am} \frac{\sum L_B}{\sum L_R} \quad (31)$$

em que,  $C_{dm}$  e  $E_{am}$  são valores médios de  $C_d$  e  $E_a$  para o ciclo.

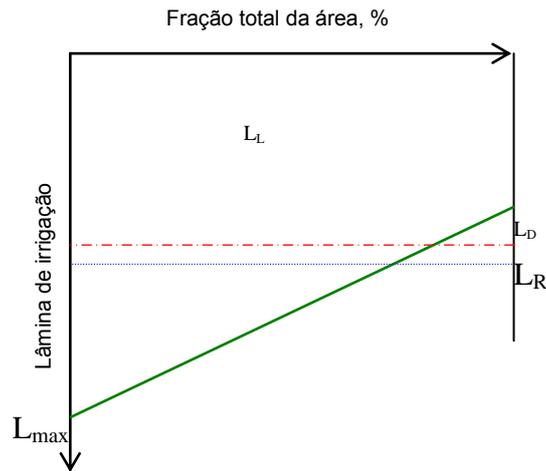


Figura 5 – Distribuição da água infiltrada na irrigação por aspersão considerando distribuição uniforme.

#### 2.4.2. Precipitação

O sucesso da produção agrícola, principalmente nas regiões úmidas, onde se trabalha com irrigação suplementar, depende das características do regime pluviométrico local. É indispensável o conhecimento da frequência e da quantidade de chuva para o planejamento das atividades agrícolas. Existem diferentes modelos para estimativa da precipitação provável conhecendo-se a série histórica de precipitação. Para modelos embasados em dados diários, períodos de dez anos são suficientes. Contudo, quando a probabilidade de chuva em determinado dia é pequena, deve-se trabalhar com períodos maiores (COOPER et al., 1987).

Para STOCKLE e DUGAS (1989), a precipitação teve mais importância que a evapotranspiração na determinação da variabilidade da demanda de irrigação, nas localidades de clima semi-árido e subúmido.

Precipitação provável ou dependente pode ser definida como sendo a quantidade mínima de precipitação com determinada probabilidade de ocorrência. Normalmente, em irrigação, trabalha-se com a precipitação provável num nível de probabilidade de 75 ou 80 %. Precipitação efetiva, em irrigação, pode ser definida como sendo a parte da precipitação que é utilizada pela cultura para atender a sua demanda evapotranspirométrica (BERNARDO, 1995).

A quantidade de água proveniente de fontes diferentes da irrigação, considerada como percentagem da ET<sub>m</sub>, é função do clima, do solo e da própria cultura, Equação 32.

$$p = \frac{W + Pe + Cf}{ET_m} \quad (32)$$

em que,

p = fração de água proveniente de fontes diferentes da irrigação, decimal;

W = variação de armazenamento de água no solo, mm;

Pe = precipitação efetiva total durante o ciclo da cultura, mm;

Cf = contribuição capilar do lençol freático, mm; e

ET<sub>m</sub> = evapotranspiração máxima da cultura, mm.

### 2.4.3. Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo de transferência de água da superfície terrestre para a atmosfera, por meio de evaporação da superfície molhada e da transpiração das culturas.

Os principais fatores que influenciam na demanda evapotranspirométrica das culturas são os climáticos, as características das plantas, as práticas culturais

e a umidade do solo, sendo as principais técnicas para estimar o requerimento de água pelas plantas baseadas em dados climáticos. É, portanto, importante a obtenção de informações meteorológicas regionais confiáveis, visando às estimativas mais precisas da evapotranspiração e ao melhor aproveitamento das precipitações naturais no dimensionamento de sistemas de irrigação (SEDIYAMA, 1996).

O conhecimento da evapotranspiração máxima - consumo de água em condições de ótima disponibilidade de água no solo - das plantas cultivadas durante seu ciclo, bem como nos diferentes estádios de desenvolvimento, é fundamental para o planejamento e manejo da água na agricultura irrigada.

SMITH (1991) definiu a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) como sendo aquela de uma cultura hipotética, com altura uniforme de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência da cobertura ao transporte de vapor de água igual a 69 s m<sup>-1</sup>.

A evapotranspiração de uma determinada cultura pode ser determinada por meio de medidas diretas, ou estimada a partir de modelos baseados na utilização de dados climáticos. Os lisímetros e o método do balanço hídrico do solo estão no primeiro grupo, enquanto, no segundo, estão os métodos empíricos, aerodinâmicos, de balanço de energia e combinado, dentre outros.

A escolha inadequada de um método para estimativa da evapotranspiração (ET), bem como a adoção de valores de ET não representativos dos períodos de crescimento da planta, em função das condições climáticas, acarretam prejuízos à planta, além de influenciar a eficiência de irrigação, devido a dimensionamento inadequado do sistema.

Um procedimento para quantificar a evapotranspiração de uma cultura é utilizar o produto da ET<sub>o</sub> por um fator denominado coeficiente de cultura. Essa metodologia proporciona uma facilidade operacional, porém, sua precisão depende de uma estimativa precisa da ET<sub>o</sub> e de uma escolha adequada do kc, o qual varia com a cultura, com a data de plantio, com o estádio de desenvolvimento da cultura, com a duração do período vegetativo, com as condições climáticas, até certo ponto com a velocidade do vento e a umidade

relativa do ar e, especialmente durante a primeira fase de crescimento, com a frequência das chuvas ou das irrigações. Para a maioria das culturas o valor de  $k_c$  médio para o período total de crescimento está entre 0,85 e 0,9 (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A partir da década de 70, devido ao desenvolvimento acelerado dos recursos computacionais e de novas pesquisas conduzidas na área das relações solo-água-plantas-atmosfera, a “Food and Agriculture Organization - FAO” decidiu por uma revisão da metodologia proposta por DOORENBOS e PRUITT (1977). Numa primeira etapa, a nova proposta da FAO é a adoção do modelo de Penman-Monteith, Equação 33, como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência.

$$ET_0 = \frac{\gamma}{\delta + \gamma^*} (R_n - G) \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{\delta + \gamma^*} \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d) \quad (33)$$

em que,

$ET_0$  = evapotranspiração de referência (mm por dia);

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );

$\delta$  = declividade da curva de saturação de pressão de vapor ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );

$\gamma^*$  = coeficiente psicrométrico modificado ( $kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$ );

$R_n$  = saldo de radiação à superfície da cultura ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );

$G$  = fluxo de calor no solo ( $MJ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );

$\lambda$  = calor latente de evaporação ( $MJ \text{ kg}^{-1}$ );

$T$  = temperatura média do ar ( $^\circ C$ );

$(e_a - e_d)$  = déficit de pressão de vapor ( $kPa$ ); e

$u_2$  = velocidade do vento a uma altura de 2 m ( $m \text{ s}^{-1}$ ).

#### 2.4.4. Coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ )

A resposta do suprimento de água sobre o rendimento é quantificada através do fator de resposta da cultura ( $k_y$ ), que relaciona a queda de rendimento

relativo  $(1 - \frac{Y_r}{Y_m})$  com o déficit de evapotranspiração relativa  $(1 - \frac{ET_r}{ET_m})$

(DOORENBOS e KASSAM, 1979).

O coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ ) também está relacionado ao déficit hídrico, indicando a sensibilidade da cultura em relação ao déficit.

A aplicação do coeficiente de resposta da cultura para o planejamento, projeto e operação dos perímetros irrigados, permite a quantificação do suprimento de água e sua utilização, em termos de produtividade da cultura e produção total para a área do projeto.

#### **2.4.5. Produtividade máxima da cultura**

A produtividade máxima da cultura ( $Y_{mp}$ ) é definida como sendo aquela obtida pela cultura adaptada ao seu ambiente de crescimento de modo a não estar sujeita a nenhum tipo de restrição durante seu ciclo de crescimento e desenvolvimento e é função das suas características genéticas.

A produção máxima " $Y_{mp}$ " é função também da duração do período total de crescimento e dos elementos climáticos temperatura, radiação solar e precipitação. De modo geral, a temperatura determina a taxa de crescimento e desenvolvimento da cultura e a duração do ciclo (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A radiação total recebida durante o ciclo influencia o crescimento e a produtividade da cultura. A maioria das culturas apresenta variedades que diferem tanto em relação às necessidades climáticas quanto em relação ao ciclo. Esta variação permite que a cultura se adapte a uma ampla faixa de condições climáticas e ao período de tempo necessário para a produção.

A produtividade máxima pode ser calculada para diferentes condições climáticas, pois os métodos de estimativa da  $Y_{mp}$  permitem a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas. Como métodos de estimativa da  $Y_{mp}$ , citam-se o de Wageningen e o da Zona Agroecológica.

#### **2.4.6. Produtividade real da cultura**

O manejo da cultura irrigada, necessário para o bom desenvolvimento de uma atividade rentável, é altamente dependente do acompanhamento da umidade do solo. Para isso, deve-se conhecer o quanto de água o perfil do solo pode armazenar para ser utilizado pela planta. A disponibilidade e a capacidade de retenção de água de um solo pode ser determinada conhecendo-se a camada do solo explorada pelas raízes, ou seja, a profundidade efetiva das raízes, a massa específica do solo e os parâmetros do solo relacionados com a umidade: capacidade de campo e ponto de murcha. O manejo da umidade do solo depende, basicamente, da capacidade de retenção de água do solo, da fração da água armazenada no solo que a cultura deve utilizar, do tempo de irrigação, da intensidade e método de aplicação e da eficiência de aplicação.

Os métodos de programação de irrigação podem ser divididos em três grupos (MANTOVANI e SOARES, 1998; SOUZA, 1993).

1) Os que se baseiam unicamente no conhecimento do estado hídrico do solo; ou seja, no manejo da água útil do solo e do nível de esgotamento máximo permitido. Neste método, são utilizados para monitoramento da umidade do solo, equipamentos como: sonda de neutrons, blocos de gesso, tensiômetros, etc.

2) Os que se baseiam no conhecimento do estado hídrico da planta, seja da forma direta, como é o caso da câmara de tensão xilemática, ou indireta, através de sua temperatura como indicador do estresse hídrico.

3) Os que se baseiam no balanço hídrico do solo. Esse balanço pode ser feito em superfícies muito reduzidas, como é o caso dos lisímetros, ou em unidades maiores, parcelas ou zonas de irrigação com diferentes níveis de precisão.

O método do balanço de água no solo destaca-se dos demais em virtude da facilidade de simulação de rotinas computacionais.

HERRERA (1987) afirma que o método do balanço de água aplicado à programação da irrigação é similar à contabilidade de uma conta bancária. Conhecendo-se o saldo de água armazenada em uma determinada camada de solo

e as quantidades extraídas e acrescentadas em um dado período, pode-se facilmente calcular o novo saldo. Assim criam-se condições para a decisão de quando e quanto irrigar.

A demanda de água da cultura deve ser atendida pela água do solo, através do sistema radicular. Se a evapotranspiração real da cultura for menor que sua evapotranspiração máxima, significa que a água do solo não está atendendo às necessidades hídricas da cultura, causando assim estresse hídrico na planta, e conseqüentemente, afetando a produtividade da cultura (DOORENBOS e KASSAM, 1979). O efeito do estresse hídrico vai depender da espécie e da variedade da cultura e do tempo e magnitude do estresse. As culturas são afetadas diferentemente em seu crescimento e produtividade pelo estresse hídrico. O efeito da água sobre a produtividade não pode ser considerado independente de outros fatores agronômicos, tais como fertilizantes, densidade de plantio e tratos culturais. Estes fatores também determinam o grau com que a produtividade real da cultura,  $Y_r$ , se aproxima da produtividade máxima,  $Y_{mp}$ .

## **2.5. Lucro financeiro**

O produtor rural ou a empresa agrícola tem por objetivo básico maximizar seus lucros, ou seja, deve procurar a melhor combinação de insumos que favoreçam os melhores resultados financeiros. Para tanto, investimentos têm sido feitos em tecnologia, visando maiores lucros por unidade de área irrigada e/ou por unidade de água aplicada. A diminuição dos custos de produção é uma prática ou alternativa que logo se apresenta. No caso da irrigação, a melhor relação água-produto deve ser observada, com o objetivo de se maximizar o lucro do produtor.

Segundo HART et al. (1980), o custo total de produção de uma cultura irrigada é dado pela Equação 34.

$$C(W) = C_o + C_w W_a \quad (34)$$

em que,

$C(W)$  = custo de produção da cultura irrigada, por unidade de área, para uma determinada lâmina de água aplicada;

$C_o$  = custo de produção da cultura, por unidade de área, incluindo todos os custos não diretamente relacionados com a aplicação de água e os custos de irrigação que não são função da lâmina de água aplicada;

$C_w$  = custo do volume unitário de água aplicado; e

$W_a$  = volume de água aplicado por unidade de área.

A receita líquida é dada pela diferença entre a receita bruta e os custos de produção envolvidos. Os custos fixos são os custos que não variam com as quantidades produzidas, já os custos variáveis variam de acordo com o nível de produção. O lucro da agricultura irrigada,  $L(W)$ , pode ser estimado através da Equação 35.

$$L(W) = P_i Y(X) - (C_o + C_w W) \quad (35)$$

em que,  $P_i$  é o preço pago pelo produto, R\$.

### **3. O MODELO COMPUTACIONAL**

Os primeiros modelos de dimensionamento, avaliação e distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão foram desenvolvidos para grandes computadores ou elaborados em ambiente DOS. De acordo com ANDRADE (1997), eles foram desenvolvidos focalizando estritamente o problema a ser resolvido, não se importando com o usuário final. Muitos destes modelos ainda são utilizados atualmente. Uma razão para explicar a não utilização de alguns modelos é sua interface gráfica pouco intuitiva para o usuário e muitas vezes com dados de entrada de difícil obtenção.

A tendência atual é desenvolver aplicativos computacionais potentes e intuitivos, pensando em primeiro lugar no usuário final do processo. Isto requer um esforço direcionado para o desenvolvimento de interfaces de fácil manipulação com diversas opções de alterações e simulações de resultados. O usuário não necessariamente deve ser um especialista, mas deve ter um mínimo de conhecimento específico na área.

O software ASPERSOR foi desenvolvido em Delphi 3, ambiente WINDOWS<sup>®</sup> 95, com base em três objetivos: simulação da uniformidade, simulação da produtividade das culturas e dimensionamento da irrigação por aspersão convencional.

O fluxograma do programa computacional está apresentado na Figura 6.

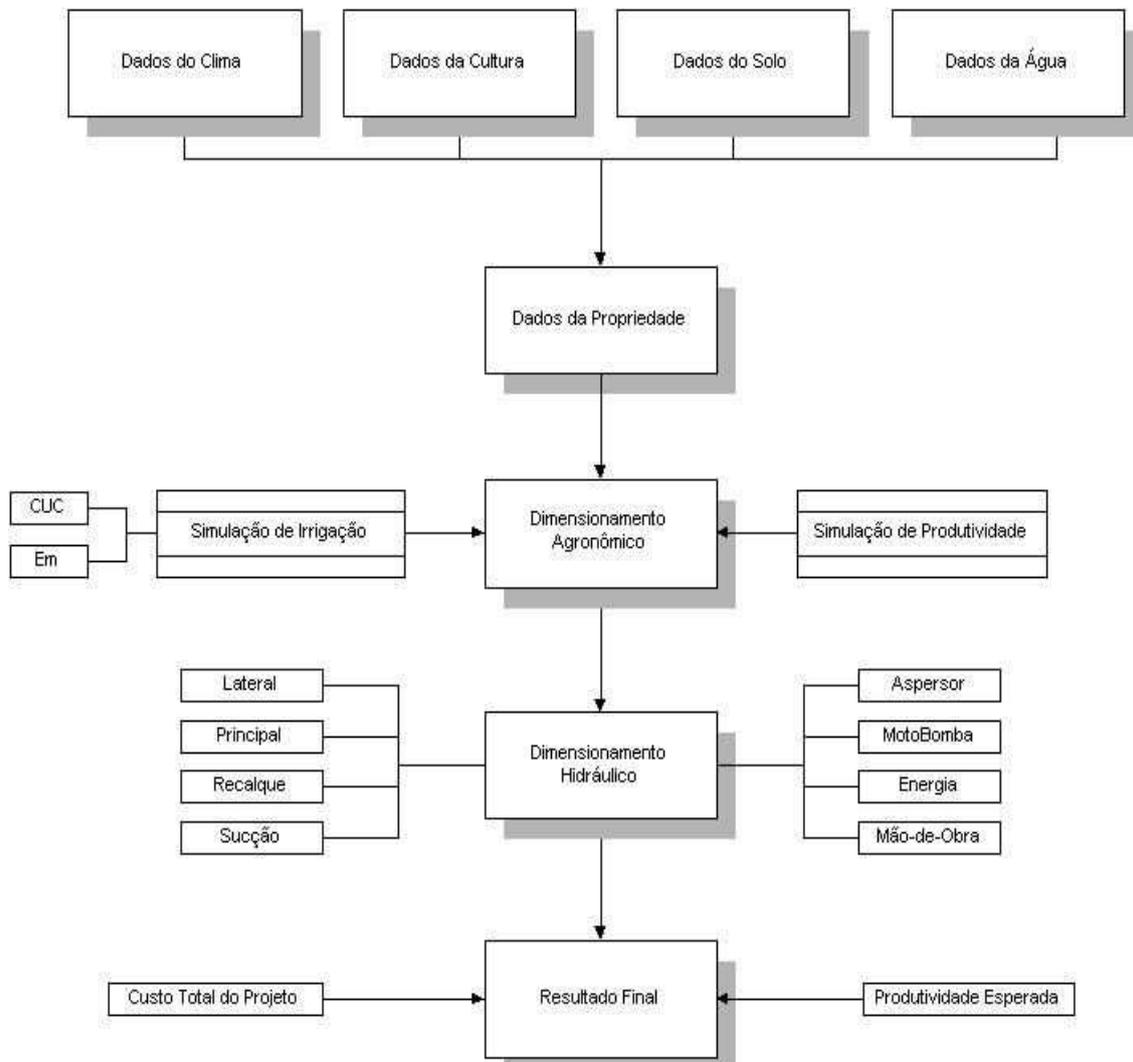


Figura 6 - Fluxograma do programa computacional.

O programa computacional ASPERSOR permite:

- 1) Simular a irrigação por aspersão convencional, a partir de uma malha inicial de precipitação de um aspersor, para diferentes condições de declividade do solo, pressão de operação do aspersor, e, velocidade e direção do vento;
- 2) Calcular a uniformidade de aplicação da água, utilizando o coeficiente de Christiansen e o coeficiente de uniformidade de distribuição, CUD;
- 3) Simular a produtividade real da cultura,  $Y_r$ .
- 4) Dimensionar economicamente a irrigação por aspersão convencional.

### 3.1. Balística da gota de água

A teoria balística, baseada no Princípio Fundamental da Dinâmica, apresentada no item 2.3.2, a qual dá suporte ao modelo hidráulico, já foi usada por vários pesquisadores, para o estudo da distribuição de água nos sistemas de irrigação por aspersão.

Um modelo computacional, **ASPERSOR**, resolve as equações diferenciais que caracterizam a trajetória de uma gota ao deixar o bocal de um aspersor, Equações 10, 11 e 12, utilizando o método de Runge-Kutta de quarta ordem.

Substituindo as Equações 13 e 14 nas Equações 10, 11 e 12, tem-se:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -c_2 v' (v_x - w_x) \quad (36)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -c_2 v' (v_y - w_y) \quad (37)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -c_2 v' (v_z - w_z) - g \quad (38)$$

$$V' = [(v_x - w_x)^2 + (v_y - w_y)^2 + (v_z - w_z)^2]^{0.5} \quad (39)$$

em que,

$v_x, v_y$  e  $v_z$  = componentes da velocidade da gota em relação ao solo, nas direções x, y e z, respectivamente,  $m s^{-1}$ ;

$w_x, w_y, w_z$  = componentes da velocidade do vento nas direções x, y e z, respectivamente,  $m s^{-1}$ ; e

$c_2$  = coeficiente de arrastamento ou de Seginer,  $m^{-1}$ .

O coeficiente de arrastamento ( $c_2$ ) considerado no modelo para cada diâmetro de gota é apresentado no Quadro 3, conforme PEREIRA (1995).

Quadro 3 - Relação entre o diâmetro de gota e o coeficiente de arrastamento ( $c_2$ )

Diâmetro (mm)	$c_2$ m <sup>-1</sup>						
0,25	8,800	1,75	0,265	3,25	0,142	4,75	0,116
0,50	2,400	2,00	0,226	3,50	0,135	5,00	0,115
0,75	1,000	2,25	0,199	3,75	0,129	5,25	0,114
1,00	0,606	2,50	0,178	4,00	0,125	5,50	0,113
1,25	0,417	2,75	0,163	4,25	0,121	5,75	0,113
1,50	0,323	3,00	0,151	4,50	0,118		

A velocidade inicial da água, ao sair do aspersor, é função da pressão de operação do aspersor, e pode ser escrita como:

$$v_i = C \sqrt{2g \frac{P}{\gamma_w}} \quad (40)$$

em que,

$v_i$  = velocidade inicial da gota, m s<sup>-1</sup>;

$C$  = coeficiente de descarga, adimensional;

$P$  = pressão de operação do aspersor, Pa; e

$\gamma_w$  = peso específico da água, N m<sup>-3</sup>.

A velocidade do vento varia logaritmicamente com a altura em relação à superfície do solo e, para condições de atmosfera neutra, isto é, taxa de razão adiabática seca, onde a variação de temperatura é de 0,65°C por cada 100 m de altura, a velocidade média do vento a uma altura  $z$  pode ser relacionada com a velocidade média do vento a uma outra altura  $H$ , pela seguinte expressão (SEDIYAMA, 1996):

$$w_z = w_H \frac{\ln\left(\frac{z - d_o}{z_o}\right)}{\ln\left(\frac{H - d_o}{z_o}\right)} \quad (41)$$

em que,

$w_z$  = velocidade média do vento à altura  $z$ , m s<sup>-1</sup>;

$w_H$  = velocidade média do vento à altura  $h$ , m s<sup>-1</sup>;

$Z$  = altura, m;  
 $z_o$  = parâmetro de rugosidade, m;  
 $d_o$  = deslocamento do plano-zero, m; e  
 $H$  = altura de referência, m;

Segundo STANHILL (1969), a relação entre o deslocamento do plano-zero, em metros, e a altura da cultura pode ser escrita como:

$$\text{Log } d_o = 0,9793 \text{ Log } h - 0,1536 \quad (42)$$

em que,  $h$  é a altura da cultura, m.

Segundo ROSENBERG et al. (1983), a relação entre o parâmetro de rugosidade e a altura da cultura pode ser escrita como:

$$\text{Log } z_o = 0,997 \text{ Log } h - 0,883 \quad (43)$$

### **3.2. Módulo de simulação da distribuição da água no solo**

No módulo simulação da uniformidade, o usuário fornece ao programa as precipitações de um aspersor operando em um plano em nível e ausência de ventos, Figura 7, bem como os dados de pressão de operação do aspersor, (kPa), vazão do aspersor, ( $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ ), ângulo do bocal do aspersor, ( $^\circ$ ), altura da haste do aspersor, (m), número de linhas e colunas na malha de coletores, espaçamento dos coletores, (m), altura da haste do coletor, (m), declividade da superfície do solo na direção X (linha lateral), ( $^\circ$ ); declividade da superfície do solo na direção Y (linha principal), ( $^\circ$ ), velocidade do vento, ( $\text{m s}^{-1}$ ), direção do vento em relação ao eixo X, ( $^\circ$ ), altura do anemômetro, (m) e altura da cultura (m). Como dados de saída, o modelo simula a uniformidade de distribuição de água, para diferentes espaçamentos entre aspersores e linhas laterais, fornecendo o CUC, o CUD, o perfil de distribuição do aspersor, as novas precipitações do aspersor e a

distribuição das gotas na superfície do solo para diversas condições de operação do sistema, Figura 8.

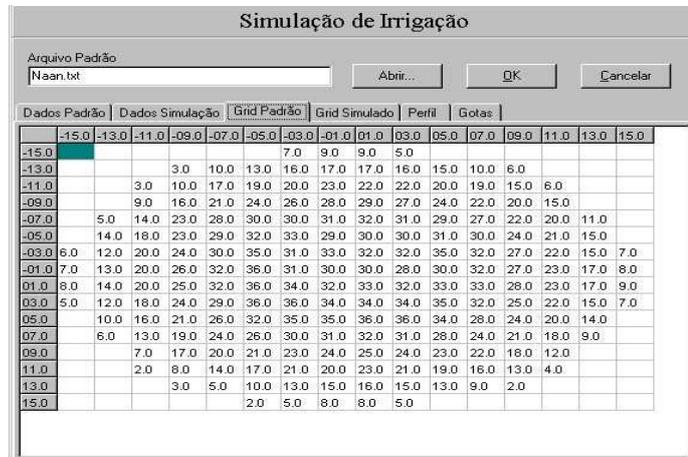


Figura 7 - Dados de precipitação de um aspersor operando em um plano em nível e sem vento.



Figura 8 - Dados de simulação (entrada e saída) da distribuição de água no solo.

A simulação permite a visualização de vários cenários, representando a realidade da área onde o projeto será instalado, principalmente no que diz respeito à declividade do solo e à velocidade e direção do vento.

O primeiro passo na simulação foi gerar o perfil de distribuição do aspersor, isto é, lâmina de água coletada versus distância ou raio do aspersor, a

partir dos dados reais de precipitação de um aspersor, trabalhando em condições de declividade zero e ausência de vento, chamada de teste padrão.

No segundo passo para a simulação, resolveu-se numericamente as Equações 36, 37 e 38, juntamente com as Equações 41, 42 e 43, para os diâmetros de gota variando de 0,25 a 6 mm, em incrementos de 0,25 mm, identificando a distância alcançada, em relação ao aspersor, por cada gota de diâmetro conhecido. Cada diâmetro de gota é relacionado à lâmina de água coletada àquela distância no teste padrão, obtida no primeiro passo para a simulação. Ou seja, assume-se que a lâmina de água que alcança o solo, a dada distância do aspersor, é proveniente das gotas de diâmetro médio conhecido, que caem no solo a dada distância do aspersor, e conseqüentemente, pode ser relacionada a um coeficiente de arrastamento, ( $c_2$ ), ou de Seginer, (Figura 9).

Portanto, as Equações 36, 37 e 38 podem ser resolvidas para cada um desses diâmetros determinando a nova posição daquela gota e respectiva lâmina de água para diferentes condições operacionais, tais como: pressão de operação, velocidade do vento e declividade da superfície do solo. Por exemplo, em relação à declividade do solo, a lâmina de água que cairia a 12,2 m do aspersor em um plano em nível, cairá a 10,2 m do aspersor numa superfície com declividade de 25°, na direção morro acima, Figura 10.

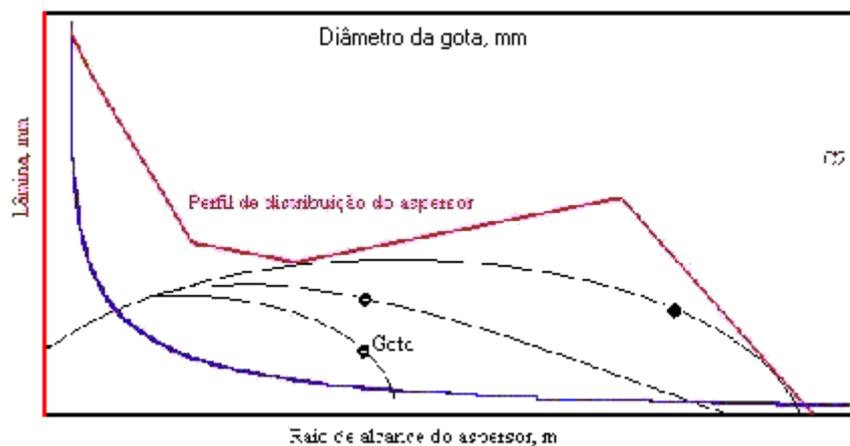


Figura 9 - Passos da simulação da distribuição da água no solo.

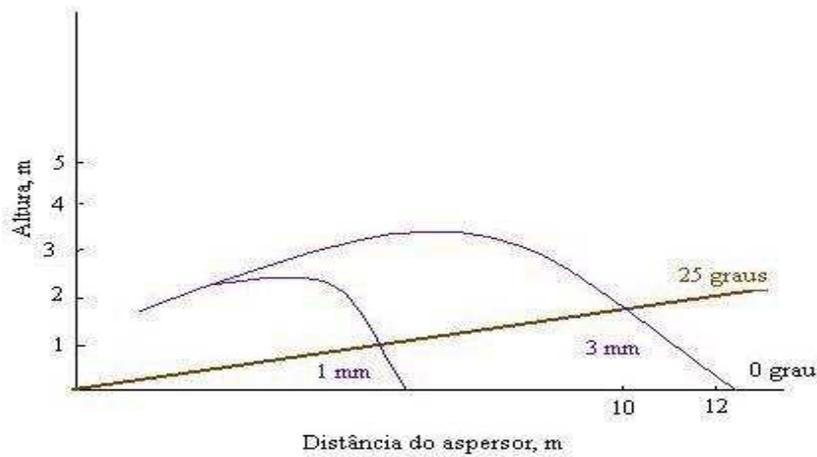


Figura 10 - Trajetórias simuladas de gotas de 1 mm e 3mm de diâmetro de um aspersor operando em um plano em nível e a 25° de declividade do solo, com pressão de operação de 317 kPa.

As novas posições das lâminas de água conhecidas, geralmente não coincidem com os pontos da malha original. Portanto, há necessidade de fazer interpolação ou extrapolação para determinar as lâminas nos pontos da malha original. O modelo utiliza a metodologia apresentada por FUKUY et al. (1980), esquematizada na Figura 11.

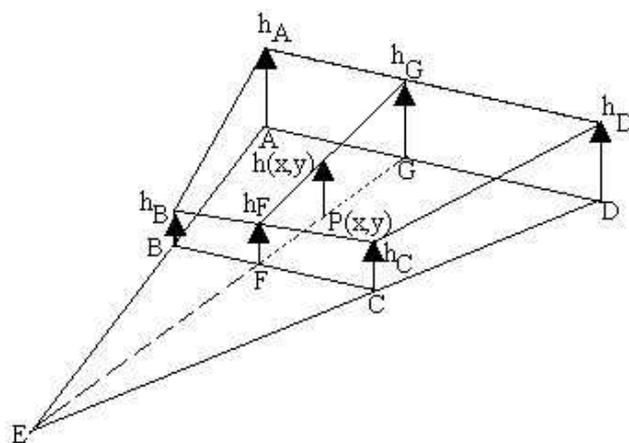


Figura 11 - Representação do método para se obter a lâmina de água,  $h(x,y)$ , para pontos  $P(x,y)$  diferentes da malha inicial.

A Figura 11 é uma representação esquemática do método para se obter a lâmina aplicada,  $h(x,y)$ . O valor de  $h(x,y)$  é determinado utilizando-se os pontos vizinhos para os quais a lâmina já foi calculada. Os pontos vizinhos  $P_o(x,y)$ ,  $P_o(x-1,y)$ ,  $P_o(x,y-1)$  e  $P_o(x-1,y-1)$  correspondem aos pontos A, B, D e C, respectivamente, na Figura 11.

Os pontos E, F e G são interseções da extensão dos segmentos AB e CD, extensão dos segmentos EP e BC, e extensão dos segmentos EP e DA, respectivamente. A lâmina aplicada no ponto  $P(x,y)$  é calculada através dos pontos A, B, C e D. Para  $P(x,y)$  que delinea o quadrângulo ABCD, a Equação 44 é válida.

$$S_{ABCD} = S_{ABP} + S_{BCP} + S_{CDP} + S_{DAP} \quad (44)$$

em que,

$$S_{ABCD} = \text{área do quadrângulo ABCD};$$

$$S_{ABP} = \text{área do triângulo ABP};$$

$$S_{BCP} = \text{área do triângulo BCP};$$

$$S_{CDP} = \text{área do triângulo CDP};$$

$$S_{DAP} = \text{área do triângulo DAP}.$$

Todas as combinações de  $x$  e  $y$  são examinadas pela Equação 44 e o quadrângulo ABCD delimitado por  $P(x,y)$  é determinado. A taxa de aplicação de água no ponto F,  $h_F$  é dada por:

$$h_F = h_C \frac{BF}{BC} + h_B \frac{CF}{BC} \quad (45)$$

Para o ponto G,  $h_G$  é igual a:

$$h_G = h_A \frac{DG}{DA} + h_D \frac{AG}{DA} \quad (46)$$

em que,  $h_A$ ,  $h_B$ ,  $h_C$  e  $h_D$  = taxas de aplicação de água nos pontos A, B, C e D, respectivamente. Dessa forma,

$$h_{(x,y)} = h_G \frac{FP}{FG} + h_F \frac{GP}{FG} \quad (47)$$

Algumas condições conceituais e operacionais são assumidas na etapa da simulação, na elaboração do programa **ASPERSOR**, a saber:

- 1) A massa da gota permanece inalterada em sua trajetória, logo seu diâmetro e seu coeficiente de arrastamento ( $c_2$ ) permanecem constantes;
- 2) A velocidade inicial da gota é igual à velocidade média do jato do aspersor;
- 3) O ângulo de trajetória inicial é igual ao ângulo de inclinação do bocal do aspersor;
- 4) As gotas são formadas a uma distância de 1 m do bocal do aspersor;
- 5) O coeficiente de descarga (C) do aspersor foi tomado igual a 0,97.
- 6) A haste do aspersor sempre forma ângulo reto com a superfície do solo.

### 3.3. Módulo de simulação da produtividade das culturas

Neste módulo, o usuário fornece ao programa os dados da cultura, do solo, do clima e data de plantio, e o modelo calcula a evapotranspiração, o turno de rega, considerando irrigação total ou suplementar, a disponibilidade total e real de água para a cultura, fornecendo gráficos e relatórios personalizados, e o fator de disponibilidade de água no solo. Com base numa série histórica de dados climáticos disponíveis no programa, o modelo calcula as precipitações provável e efetiva, orientando o usuário quanto ao momento de irrigar e quanto a quantidade de água a ser aplicada, diminuindo as chances de perdas de água por aplicações desnecessárias.

O conceito de função de produção baseia-se na teoria de que o rendimento das culturas é afetado pelas variações da umidade do solo, durante o

ciclo fenológico da cultura. Em condições em que a água não é fator limitante da produção, é grátis, e o custo da energia é reduzido, a produção ótima econômica é muito próxima da produção máxima da cultura.

O conhecimento da resposta dos cultivos ao regime de irrigação é fundamental para a otimização da utilização da água. Para quantificar o impacto na produção dos cultivos de uma lâmina deficitária de irrigação, utilizou-se o Modelo Combinado (MANTOVANI, 1993).

Este módulo utiliza como condições iniciais, ou dados de entrada do programa:

1) Dados relacionados às características físico-hídricas do solo, como: velocidade de infiltração básica, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e massa específica do solo, para o cálculo da disponibilidade de água no solo.

2) Dados relacionados à cultura, como: tipo de cultura, data de plantio, profundidade efetiva das raízes, duração dos estádios fenológicos, graus dias acumulados em cada estágio no ciclo fenológico, coeficiente da cultura ( $k_c$ ), coeficiente de resposta da cultura ao déficit hídrico ( $k_y$ ) e fator de disponibilidade hídrica.

3) Dados climáticos que permitam a estimativa das precipitações provável e efetiva, do balanço hídrico e da demanda evapotranspirativa.

4) Dados locais de latitude e altitude.

A umidade inicial da camada do solo, para fins de simulação, foi considerada como igual à da capacidade de campo.

A partir da data de plantio até a colheita, são simulados os dias de cada estágio fenológico através dos valores diários dos graus dias acumulados (GD), coeficiente da cultura ( $k_c$ ), profundidade radicular (D), coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ ), recepção real de radiação de ondas curtas (Rs), recepção máxima de radiação ativa de ondas curtas nos dias claros (Rse), lâmina bruta aplicada (Hb) e lâmina requerida (Hr) pela cultura durante seu ciclo fenológico. O balanço hídrico diário na camada de solo, correspondente à profundidade das raízes, é

feito para todo ciclo da cultura, tendo como entrada os dados do clima, do solo e da cultura, além da data de plantio. Dentre os seus resultados, pode-se destacar as lâminas de irrigação total necessária (ITN) e real necessária (IRN), precipitação efetiva (Pe) e evapotranspiração (ETo, ETc, ETm e ETs).

Como resultado, o programa estima a produtividade real da cultura, Yr, calculada pelo modelo combinado (MANTOVANI, 1993) e a produtividade máxima, Ym, calculada pelo método da zona Agroecológica (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A evapotranspiração de referência, em nível diário, foi calculada pelo método combinado de Penman-Monteith, Equação 33.

O modelo computacional permite que o usuário calcule a ETo para diferentes períodos, como: pentadial, decendial, mensal, e por estágio de desenvolvimento da cultura.

Os valores de  $\Delta$ , ea, ed, Rn, Rns, Rs, N,  $\omega_s$ ,  $\delta$  e Ra, dr, Rnl, G da Equação 33, foram calculados utilizando as Equações 48 a 60.

$$\Delta = 4098 \frac{ea}{(T + 237,3)^2} \quad \text{Eq.48}$$

$$ea = 0,611 e^{\frac{17,27T}{T+237,3}} \quad \text{Eq.49}$$

$$ed = \frac{UR}{\frac{50}{ea(Tn)} + \frac{50}{ea(Tx)}} \quad \text{Eq.50}$$

$$Rn = Rns - Rnl \quad \text{Eq.51}$$

$$Rns = (1 - \text{albedo})Rs \quad \text{Eq. 52}$$

$$Rnl = 2,45 \times 10^{-9} \left( 0,9 \frac{n}{N} + 0,1 \right) \left( 0,34 - 0,14 \sqrt{ed} \right) \left( T_x + 273,15 \right)^4 + \left( T_n + 273,15 \right)^4 \quad \text{Eq.53}$$

$$Rs = \left( 0,25 + 0,50 \frac{n}{N} \right) Ra \quad \text{Eq. 54}$$

$$N = 7,64 \omega_s \quad \text{Eq.55}$$

$$\omega_s = \arccos \left( \tan \varphi \tan \delta \right) \quad \text{Eq.56}$$

$$\delta = 0,409 \sin(0,0172J - 1,39) \quad \text{Eq.57}$$

$$Ra = 37,6dr \left( \omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s \right) \quad \text{Eq.58}$$

$$dr = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad \text{Eq.59}$$

$$G = 0,38(T_i - T_{i-1}) \quad \text{Eq.60}$$

em que,

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C<sup>-1</sup>;

ea = pressão de vapor de saturação, kPa; e

e = base do logaritmo natural, adimensional.

ed = pressão real de vapor, kPa;

UR = umidade relativa média do dia, %;

ea(Tn) = pressão de saturação de vapor à temperatura mínima Tn, kPa; e

ea(Tx) = pressão de saturação de vapor à temperatura máxima Tx, kPa.

Rns = saldo de radiação de ondas curtas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

Rnl = saldo de radiação de ondas longas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>;

Tx = temperatura máxima do dia, °C;

Tn = temperatura mínima do dia, °C;

albedo = 0,23; adimensional; e

Rs = radiação de ondas curtas, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

n/N = fração relativa de luz solar, adimensional;

n = horas de brilho solar diário, h;

N = duração total do dia, h; e

Ra = radiação solar extraterrestre, MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

dr = distância relativa Terra-Sol, adimensional;

$\varphi$  = latitude, rad;

$\delta$  = declinação solar, rad; e

$\omega_s$  = ângulo horário do pôr do sol, rad.

J é o número do dia do ano, adimensional.

T<sub>i</sub> = temperatura média do dia i, °C;

T<sub>i-1</sub> = temperatura média do dia i-1, °C;

A correção para a velocidade do vento em função da altura do anemômetro foi feita por meio da Equação 61.

$$\frac{U_2}{U_z} = \frac{4,87}{\ln(7,8 z - 5,42)} \quad \text{Eq.61}$$

em que,

$U_z$  = velocidade do evento medida à altura  $z$ ,  $\text{m s}^{-1}$ ; e

$Z$  = altura de medição da velocidade do vento,  $\text{m}$ ,  $z = 10\text{m}$ .

Os valores de  $\gamma$ ,  $P$  e  $\lambda$  foram obtidos por meio das Equações 62 a 64, respectivamente.

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad \text{Eq.62}$$

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad \text{Eq.63}$$

$$P = 101,3 \left( \frac{293 - 0,0065 Z}{293} \right)^{5,26} \quad \text{Eq.64}$$

em que,

$P$  = pressão atmosférica,  $\text{kPa}$ ;

$\lambda$  = calor latente,  $\text{MJ kg}^{-1}$ ; e

$Z$  é a altitude,  $\text{m}$ .

A precipitação provável foi determinada, em nível de projeto, com 75% de probabilidade, porém o usuário pode definir este valor. A periodicidade de arranjo dos dados também pode ser definida pelo usuário, podendo ser diária, pentadial, semanal, decendial, quinzenal, e mensal.

O modelo de distribuição de probabilidade empregado foi a distribuição Gama, utilizando um modelo misto, segundo metodologia sugerida por THOM (1966), conforme Equação 65.

$$P(Y' \leq y') = P_s + P_c G(Y' \leq y') \quad (65)$$

em que,

$Y'$  = variável aleatória de precipitação;

$y'$  = valor que tem probabilidade acumulada  $G(Y)$  de ocorrência;

$P_s$  = probabilidade de ocorrência de períodos secos;

$P_c$  = probabilidade de ocorrência de períodos chuvosos;

$G(Y')$  = distribuição de probabilidade Gama.

A distribuição de probabilidade Gama, que representa a probabilidade de ocorrência de precipitação igual ou inferior a  $y$ , pode ser expressa pela Equação 66.

$$G(Y' \leq y') = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} \int_0^{y'} Y'^{\alpha-1} e^{-Y'/\beta} dY' \quad (66)$$

para  $Y, \alpha, \beta, \Gamma(\alpha) > 0$

em que,

$\alpha$  = parâmetro de forma;

$\beta$  = parâmetro de escala da variável aleatória  $Y$ ; e

$\Gamma(\alpha)$  = função Gama;

A função Gama é expressa pela Equação 67.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y'^{\alpha-1} e^{-y'} dy' \quad (67)$$

A função Gama pode ser obtida, por aproximação, pela Equação 68.

$$\Gamma(\alpha) = \sqrt{\frac{2\pi}{\alpha}} e^{\alpha[L\pi\alpha - f(\alpha)]} \quad (68)$$

em que,

$$f(\alpha) = 1 - \frac{1}{12\alpha^2} + \frac{1}{360\alpha^4} - \frac{1}{1260\alpha^6} \quad (69)$$

Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  podem ser obtidos pelas Equações 70 e 71.

$$\alpha = \frac{1}{4A'} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A'}{3}} \right) \quad (70)$$

$$\beta = \frac{\overline{Pp}}{\alpha} \quad (71)$$

em que,

$$A' = \text{Ln } \overline{Pp} - Pp_g \quad (72)$$

em que,

$$\overline{Pp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pp_i \quad (73)$$

$$Pp_g = \frac{1}{N \sum_{i=1}^N \text{Ln}(Pp_i)} \quad (74)$$

em que,

$\overline{Pp}$  = média aritmética das observações;

$Pp_g$  = média geométrica das observações.

A Equação 66 não tem solução imediata, assim sendo, as estimativas das chuvas, para determinados valores de probabilidade, foram obtidas através de desenvolvimento em série, por meio da seguinte função:

$$G(t'') = \frac{t''^\alpha}{\alpha \Gamma(\alpha) e^{t''}} F(\alpha, t'') \quad (75)$$

em que,

$$t'' = Y/\beta ;$$

$$F(\alpha, t'') = 1 + \frac{t''}{\alpha + 1} + \frac{t''^2}{(\alpha + 1)(\alpha + 2)} + \frac{t''^3}{(\alpha + 1)(\alpha + 2)(\alpha + 3)} + \dots \quad (76)$$

A probabilidade de ocorrência de um valor de chuva menor ou igual a Y é dada por G(t'').

Para a estimativa da quantidade de chuva Y, a um determinado valor de probabilidade, Pr, determina-se o valor de t'', na Equação 75, que satisfaça a igualdade:

$$G(t'') - Pr = 0 \quad (77)$$

Para isso, utilizou-se o método de Newton-Raphson, na forma:

$$t''_{i+1} = t''_i - \frac{\frac{t''_i^\alpha}{\alpha \Gamma(\alpha) e^{t''_i}} F(\alpha, t''_i) - Pr}{\frac{t''_i^{\alpha-1}}{\Gamma(\alpha) e^{t''_i}}} \quad (78)$$

Para iniciar as iterações para cálculo do valor inicial de  $t''_o$ , o qual depende de  $\alpha$  e  $Pr$ , utilizou-se as Equações 79 a 83.

Para  $\alpha \geq 1,0$  e  $Pr \geq 0,50$ ,

$$t''_o = \text{Ln} \frac{1}{1 - Pr} + [1,51 - 2 Pr(1 - Pr)](\alpha - 1) \quad (79)$$

para  $\alpha \geq 1,0$  e  $Pr < 0,50$ ,

$$t''_o = \text{Ln} \frac{1}{1 - Pr} + [0,49 - 2 Pr(1 - Pr)](\alpha - 1) \quad (80)$$

para  $\alpha < 1,0$  e  $0,50 < Pr < 0,90$ ,

$$t''_o = \frac{1,309 Pr}{1 - 0,658 Pr^2} - 0,10 \quad (81)$$

para  $\alpha < 1,0$  e  $Pr \geq 0,90$ ,

$$t''_o = \frac{1,309 Pr}{1 - 0,658 Pr^2} - 0,06 \quad (82)$$

para  $\alpha < 1,0$  e  $Pr \leq 0,50$ ,

$$t''_o = 0,01 \quad (83)$$

### 3.3.1. Modelo Combinado

O modelo combinado, (MANTOVANI, 1993), relaciona a produtividade da cultura com a água de irrigação e a uniformidade de aplicação. Para a estimativa da produtividade da cultura o modelo utiliza, como dados de entrada, a produtividade máxima da cultura,  $Y_m$ , o coeficiente de resposta da cultura,  $k_y$ , o coeficiente de déficit,  $C_d$ , e a quantidade de água,  $p$ , proveniente de fontes diferentes da irrigação, para a cultura, durante seu ciclo fenológico. O modelo é expresso pela Equação 25.

O coeficiente de déficit ( $C_d$ ) é um índice relacionado ao manejo de água e ao atendimento da demanda hídrica da cultura pela irrigação. Verifica-se que  $C_d$  apresenta dois componentes, um tecnológico, associado à eficiência do manejo e outro estratégico, associado a magnitude da lâmina de irrigação a ser aplicada. É calculado pelas Equações 84 e 85.

$$C_d = \begin{cases} \frac{1-a}{2} \left[ 1 - \frac{LB}{LR} (2CUC - 1) \right], & LB \geq LR \\ \frac{LR - LB}{LR}, & LB < LR \end{cases} \quad (84)$$

$$a = \frac{1}{4 - 4CUC} \left( 3 - 2CUC - \frac{LR}{LB} \right) \quad (85)$$

A estimativa das fontes de água para a cultura ( $p$ ), diferentes da irrigação, é uma variável relacionada aos fatores edáficos, climáticos e da própria cultura, sendo determinada pela Equação 32.

### 3.3.2. Coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ )

O coeficiente de resposta da cultura ( $k_y$ ) indica a sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. DOORENBOS e KASSAM (1979) determinaram os valores

de  $k_y$  para o período total de crescimento e para os diferentes estádios de crescimento de várias culturas, a partir da avaliação de inúmeros resultados de pesquisa encontrados na literatura.

Os valores de  $k_y$  para a maioria das culturas são deduzidos, supondo-se que a relação entre o rendimento relativo ( $\frac{Y_r}{Y_m}$ ) e a evapotranspiração relativa

( $\frac{ET_r}{ET_m}$ ) é linear e válida para déficits hídricos até cerca de 50 %, ou seja,

$[1 - \frac{ET_r}{ET_m}] = 0,5$ . Esses valores são baseados em uma análise de dados experimentais de campo.

Na ausência de dados locais de  $k_y$ , o modelo utiliza os dados tabelados encontrados em DOORENBOS e KASSAM (1979).

### **3.3.3. Produtividade máxima da cultura ( $Y_{mp}$ )**

Os fatores climáticos que determinam  $Y_{mp}$  são: temperatura, radiação solar e duração do período total de crescimento; além de algumas necessidades específicas para o desenvolvimento da cultura, tais como temperatura e duração do dia. Geralmente, a temperatura determina a taxa de desenvolvimento da cultura e a duração do período total de crescimento necessário para formação de produção (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

A produtividade máxima pode ser calculada para diferentes condições climáticas. Os métodos de estimativa de  $Y_{mp}$  permitem a quantificação do potencial produtivo de diferentes áreas, identificando, desse modo, as mais apropriadas para a produção de determinada cultura.

Neste estudo, para a estimativa da produtividade máxima da cultura, foi utilizado o método da Zona Agroecológica, pois, apesar de desenvolvido para estimar a produtividade da cultura em base continental, também pode ser aplicado até um nível de detalhe, necessário para se ajustar à localidades específicas. Este método utiliza os conceitos de cultura padrão de De Wit e da

taxa de produção de matéria seca de folhas ( $y_m$ ).

O valor de  $Y_{mp}$ ,  $\text{kg ha}^{-1} \text{ período}^{-1}$ , representa o nível de referência de produtividade atingível com alto padrão de manejo da cultura e da água, em que não há limitações de clima, água e nutrientes e sem ataque de pragas e doenças (Equação 86), (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

$$Y_{mp} = cLcNcHG \left[ \frac{a + b y_m}{c + d Y_m} \right] + \left[ \frac{F}{c + d Y_m} \right] \quad (86)$$

em que,

$cL$  = correção em função do desenvolvimento da cultura com relação ao tempo e à área foliar, adimensional;

$cN$  = correção para a produção de matéria seca, adimensional;

$cH$  = correção para o índice de colheita, adimensional;

$G$  = período total de crescimento, dia;

$F$  = parte do dia em que o céu está nublado, fração;

$Y_m$  = taxa máxima de produção bruta de matéria seca de folhas,  $\text{kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ;

$y_o$  = produção bruta de matéria seca da cultura padrão, para determinado local, num dia completamente nublado,  $\text{kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ; e

$y_c$  = taxa de produção bruta de matéria seca da cultura padrão, para determinado local, produzida num dia claro,  $\text{kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

Os valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  são iguais a 0,8; 0,01; 0,5 e 0,025, respectivamente, para  $y_m \geq 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ; e iguais a 0,5; 0,025; 0 e 0,05, respectivamente, para  $y_m < 20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ .

### 3.3.4. Balanço hídrico no solo

O balanço de água no solo, ao longo do ciclo da cultura, foi realizado utilizando a Equação 87.

$$Arm_i = Arm_{i-1} + Prec_i + Irr_i - ETc_i - Esc_i - Exc_i \quad (87)$$

em que,

$Arm_i$  = água disponível no solo no dia  $i$ , mm;

$Arm_{i-1}$  = água disponível no solo no dia  $i-1$ , mm;

$Prec_i$  = precipitação do dia  $i$ , mm;

$Irr_i$  = irrigação realizada no dia  $i$ , mm;

$ETc_i$  = evapotranspiração da cultura no dia  $i$ , mm;

$Esc_i$  = escoamento superficial do dia  $i$ , mm; e

$Exc_i$  = excesso hídrico do dia  $i$ , mm;

O balanço hídrico foi feito em base diária, considerando a camada do solo à profundidade  $Z'$  e as características físico-hídricas do solo: capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PM) e massa específica do solo ( $Ds$ ). As irrigações foram simuladas quando o déficit de água no solo correspondeu ao valor definido pelo fator de disponibilidade de água no solo (DOORENBOS e PRUITT, 1977).

A lâmina de água no solo no dia  $i$  foi obtida pela Equação 88.

$$Lam_i = 10 (Ua_i - PM) Ds D \quad (88)$$

em que,

$Lam_i$  = lâmina de água, à profundidade das raízes, no dia  $i$ , mm;

$Ua_i$  = umidade atual do solo no dia  $i$ , % em peso;

$D$  = espessura da camada do solo, explorada pelas raízes, m.

### 3.3.5. Precipitação efetiva

A precipitação efetiva foi calculada pela Equação 89, (MOTA e OLIVEIRA, 1978). Valores de precipitação inferiores a 22 mm foram tomados como efetivos.

$$Pe_i = 19,9784 \ln(Prec_i) + [34,6123 - 10,7001 \ln(Prec_i)] \frac{Arm_{i-1}}{CTA_i} - 41,3155 \quad (89)$$

em que,  $CTA_i$  é a capacidade total de água no solo no dia  $i$ , mm;

O valor diário da capacidade total de água no solo ( $CTA_i$ ) foi calculado pela Equação 90.

$$CTA_i = 10(CC - PM) D_s \cdot D_i \quad (90)$$

em que  $D_i$  é a espessura da camada do solo, explorada pelas raízes, no dia  $i$ , m.

### 3.3.6. Cálculo da ETc

O modelo assume que a ETc seja igual à ETm até que se tenha esgotado a fração ( $f$ ) da água total disponível no solo por unidade de comprimento ( $Sa$ ) na profundidade radicular ( $D$ ). Para um nível além do esgotamento da fração ( $f$ ) da água total disponível no solo ( $Sa D$ ), a ETc diminui em relação a ETm.

$$ETc = \begin{cases} ETm, & \text{para } t' < \frac{f Sa D}{ETm} \\ \frac{Sa D}{t'} \left[ 1 - (1-f) e^{\frac{-ETm t'}{(1-f) Sa D} + \frac{f}{1-f}} \right], & \text{para } t' \geq \frac{f Sa D}{ETm} \end{cases} \quad (91)$$

em que,

$t'$  = número de dias após a última irrigação ou precipitação, dia;

$f$  = fator de disponibilidade hídrica, adimensional. ( $f$  varia com a altura, com as fases do ciclo fenológico e com as condições climáticas, em especial a ETm).

O valor de  $Sa$  (DRA) foi obtido por meio da Equação 92.

$$Sa = 10(CC - PM) D_s \quad (92)$$

### 3.3.7. Cálculo do escoamento superficial

O escoamento superficial diário ( $Esc_i$ ) foi calculado pela Equação 93.

$$Esc_i = Prec_i - Pe_i \quad (93)$$

### 3.3.8. Cálculo do excesso hídrico

O valor diário do excesso hídrico ( $Exc_i$ ) foi calculado, nos limites apresentados, pela Equação 94.

$$Exc_i = \begin{cases} Lam_i - CTA_i, & \text{para } Lam_i > CTA_i \\ 0, & \text{para } Lam_i \leq CTA_i \end{cases} \quad (94)$$

### 3.3.9. Cálculo da irrigação

O valor diário da irrigação ( $Irr_i$ ) foi igual a irrigação total necessária ( $ITN_i$ ) a qual foi calculada pela Equação 96.

$$IRN_i = (1 - f)CTA_i \quad (95)$$

O momento da irrigação foi definido quando  $Lam_i \leq IRN_i$ .

$$ITN_i = \frac{IRN_i}{Epa} \quad (96)$$

em que,  $Epa$  é a eficiência de aplicação baseada na percentagem da área adequadamente irrigada, pa, adimensional.

### **3.3.10. Produtividade da cultura**

A produtividade da cultura ( $Y_r$ ) foi estimada utilizando o método de Mantovani (Equação 23). A solução desta equação requer dados da cultura, os quais foram obtidos por meio do balanço hídrico diário simulado, para todo o ciclo da cultura.

### **3.3.11. Cálculo de Cd**

O cálculo do valor de Cd foi feito utilizando as Equações 84 e 85 tomando  $L_b$  como sendo o valor de Irr, e  $L_r$  como sendo o valor de IRN. Esses valores foram obtidos por meio do balanço hídrico diário.

### **3.3.12. Cálculo de p**

A estimativa das fontes de água para a cultura ( $p$ ) exceto a de irrigação foi feita a partir da Equação 32, considerando apenas os valores da precipitação efetiva, a qual foi obtida por meio do balanço hídrico diário.

## **3.4. Módulo de dimensionamento do sistema de irrigação**

No módulo dimensionamento da irrigação por aspersão convencional, o usuário fornece ao programa as características da área a ser irrigada, que o programa utiliza juntamente com os dados já fornecidos nos módulos de simulação da distribuição de água e simulação do rendimento das culturas. A metodologia seguida é uma modificação da apresentada por SOARES (1998).

### 3.4.1. Dados de entrada

Os dados de entrada do programa são:

1) Características físico-hídricas do solo, como: velocidade de infiltração básica, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e massa específica do solo utilizados para o cálculo da disponibilidade de água no solo.

2) Dados relacionados à cultura, como: tipo de cultura, profundidade efetiva das raízes, coeficientes da cultura e duração dos estádios fenológicos e fator de disponibilidade hídrica.

3) Dados climáticos que permitam a estimativa das precipitações provável e efetiva, do balanço hídrico, e da demanda evapotranspirativa.

4) Disponibilidade de energia elétrica e de mão-de-obra na região.

A partir dos dados de entrada, o modelo simula a demanda de irrigação e pré-seleciona os aspersores disponíveis no mercado capazes de satisfazer a mesma.

### 3.4.2. Dimensionamento hidráulico

Entre as etapas necessárias para a elaboração de um projeto de irrigação por aspersão, encontra-se a de dimensionamento das tubulações. Estas devem ser capazes de transportar e abastecer, em cada tomada d'água, a vazão requerida pelo sistema, à pressão adequada para o funcionamento do aspersor. O dimensionamento hidráulico das tubulações do sistema de irrigação foi feito, empregando a Equação de Hazen-Williams, expressão 97a.

$$h_f = 10,641 \left( \frac{Q}{C} \right)^{1,85} \frac{L \cdot F}{D^{4,87}} \quad (97a)$$

$$F = \frac{2N}{2N-1} \left[ \left( \frac{1}{m+1} \right) + \frac{\sqrt{m-1}}{6N^2} \right] \quad (97b)$$

em que,

F = fator de redução de perda de carga, adimensional;

hf = perda de carga real ao longo da linha lateral, mca;

Q = vazão da linha lateral, m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>;

C = coeficiente de Hazen-Williams, adimensional;

L = comprimento da linha lateral, m;

D = diâmetro interno da linha lateral, m;

N = número de aspersores na linha lateral; e

m = expoente da vazão na equação de perda de carga, que neste caso foi de 1,85.

Esta equação pode ser escrita para o cálculo do diâmetro interno da tubulação, conforme segue:

$$D = 1,625 \left( \frac{Q}{C} \right)^{0,38} \left( \frac{L \times F}{hf} \right)^{0,205} \quad (98)$$

O dimensionamento da linha principal foi baseado na análise econômica, método das tentativas. O custo anual fixo, CAF, foi determinado pelas Equações 99 e 100.

$$CAF = (VI - VR) FRC \quad (99)$$

$$FRC = \frac{(1+i)^u - 1}{i} \quad (100)$$

em que,

VI = valor do investimento, R\$;

VR = valor de resgate do equipamento, ao final da vida útil, R\$;

FRC = fator de recuperação do capital;

i = taxa anual de juro, decimal; e

u = vida útil do equipamento, ano.

O custo anual variável corresponde aos custos anuais de energia, mão-de-obra, operação e manutenção do sistema.

O custo de energia depende da fonte, do seu preço por unidade, da potência absorvida do motor, do número de horas de trabalho e do consumo médio por hora.

O custo da mão-de-obra, CMO, por ciclo, é dado pela seguinte expressão (ZOCOLER et al., 1997):

$$CMO = \frac{Ntl \times Nlp \times Npd \times Nda \times Nht \times Rsd}{Nhd} \quad (101)$$

em que,

Ntl = número de tubos na linha lateral, adimensional;

Nlp = número de linhas laterais, adimensional;

Npd = número de posições por dia;

Nda = número de dias de operação por ano, dia;

Nht = número de horas de mudança por tubo, hora;

Rsd = Valor monetário da diária ou custo do homem/dia, R\$; e

Nhd = número de horas de trabalho por dia, hora/dia.

O custo de operação e manutenção do sistema foi desprezado, pois se está comparando diferentes diâmetros para uma mesma condição. Isto só não é válido quando, ao alterar o diâmetro, altera-se o subgrupo de classificação do projeto.

As bombas centrífugas são as mais utilizadas nos sistemas de irrigação. Com a vazão e a altura manométrica do sistema, pode-se selecionar a bomba que dê o maior rendimento, utilizando o catálogo do fabricante ou o aplicativo Maxibombas, acessado diretamente pelo programa.

O aplicativo ASPERSOR possui um banco de dados de aspersores, tubulações e peças especiais de diferentes materiais e fabricantes, motores elétricos e diesel, bombas centrífugas, o qual pode ser modificado a qualquer tempo possibilitando atualização periodicamente.

O modelo possibilita também o acesso ao aplicativo computacional "Maxbombas", desenvolvido no DEA/UFV.

### 3.4.3. Seqüência de cálculo

O módulo de dimensionamento do sistema de irrigação está dividido em passos, os quais realizam operações específicas, porém interrelacionadas, culminando com o relatório completo do projeto, onde materiais e custos são especificados. Em qualquer passo, o usuário pode sair do programa e voltar ao sistema operacional.

O primeiro passo, Figura 12, consta do cadastro do projeto e do fornecimento dos dados referentes às informações preliminares de identificação, como: nome da propriedade, nome do proprietário, localização, nome da cultura, tipo de solo, fonte de água, estação climatológica, fonte de energia utilizada nos motores, horas diárias de funcionamento do projeto, tempo de mudança das linhas laterais e dimensões da área.

The screenshot displays a software window titled "Passo 1 - Informações Preliminares". It contains several input fields and controls:

- Nome da Propriedade:** Text box containing "Propriedade Tesé".
- Nome do Proprietário:** Text box containing "João Hélio Torres D'Ávilla".
- Localização:** Text box containing "Viçosa - MG".
- Energia:** A sub-panel with two radio buttons: "Elétrica" (selected) and "Diesel". To the right, there are two text boxes: "Tdf - horas/dia" with value "20.00" and "Tnp - horas" with value "1.00".
- Nome da Cultura:** Dropdown menu with "Feijão" selected.
- Tipo de Solo:** Dropdown menu with "Latossolo - Viçosa" selected.
- Fonte de Água:** Dropdown menu with "Ribeirão São Bartolomeu" selected.
- Estação Climatológica:** Dropdown menu with "Viçosa - MG" selected.
- Área:** A sub-panel with three text boxes: "Área - m2" with value "414720.00", "Comp. - m" with value "720.00", and "Larg. - m" with value "576.00".

At the bottom of the window, there are four buttons: "Anterior" (with a left arrow), "Próximo" (with a right arrow), "Salvar" (with a floppy disk icon), and "Sair" (with a yellow lightning bolt icon).

Figura 12 – Tela correspondente ao passo 1 do módulo de dimensionamento do sistema de irrigação.

Alguns campos apresentam caixa de seleção, a qual permite ao usuário, escolher a informação previamente cadastrada e cadastrar informações que serão posteriormente utilizadas. Após preenchimento de cada um dos campos, deve-se clicar em <ENTER>. A movimentação do cursor para os campos pode ser feita usando o mouse ou a tecla <Tab>. Em determinados campos, as informações estão protegidas, isto é, se forem preenchidos com valores não compatíveis, mensagens específicas de erro surgirão na tela, para orientação do usuário.

Após o preenchimento dos campos, clica-se em <próximo> e avança-se para o passo seguinte. Alguns campos, nos passos seguintes, não permitem preenchimento, pois são preenchidos automaticamente pelo programa, não permitindo alterações.

No passo 2, Evapotranspiração, Figuras 13 a 16, o usuário informa a data de plantio para início da simulação do balanço hídrico. O programa calcula, em nível diário, a evapotranspiração de referência, empregando o método de Penman-Monteith (PEREIRA et al., 1997), mostrando seu valor médio durante o ciclo da cultura. Calcula a evapotranspiração máxima da cultura, no ciclo, com base na frequência de distribuição de ocorrência, de acordo com a metodologia do papel log-normal, descrita por BERNARDO (1995); a evapotranspiração média da cultura, além da evapotranspiração sazonal. Calcula a precipitação provável do período, por meio do ajuste da série histórica de dados a distribuição de probabilidade gama, comentada na seção anterior. Calcula a velocidade média do vento no período, o turno de rega mínimo e o fator de disponibilidade  $f$ , o qual depende da demanda da irrigação e da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico. Fornece ainda gráficos e tabelas personalizados dos resultados.

### Passo 2 - Evapotranspiração

Data do Plantio 01/12/1993	Data da Colheita 15/03/1994	Balço Hídrico...
ET <sub>o</sub> média - mm/dia 6.30	Período - dias 7	
ET <sub>p</sub> máxima - mm/dia 7.20	Pe - mm/período 0.00	
ET <sub>c</sub> média - mm/dia 1.99	Vv - (m/s)/dia 1.57	
ET <sub>s</sub> total - mm/ciclo 381.00	f média - dec 0.42	

← Anterior      Próximo →      Salvar      Sair

Figura 13 - Tela 2 do módulo de dimensionamento do sistema de irrigação.

As produtividades, potencial e real, das culturas, são estimadas nesse passo, Figura 15. A produtividade máxima é estimada com base no método da zona agroecológica (DOORENBOS e KASSAM, 1979) e a produtividade real é estimada pelo modelo combinado (MANTOVANI, 1993).

### Balço Hídrico Diário

Informações | Resultados | Tabelas | Gráficos

Data do Plantio 01/12/1993	Balço Hídrico Calcular 0%	Divisão do Ciclo Período - dias 7
Cultura Feijão	Estação <input type="radio"/> Dados Reais <input checked="" type="radio"/> Série Histórica	Uniformidade Em - % 80 CUC - % 80
Solo Latossolo - Viçosa	Tipo de Irrigação <input type="radio"/> Total <input checked="" type="radio"/> Suplementar	Probabilidade ETpotencial - % 75 Precipitação - % 75
Estação Viçosa - MG	OK      Cancelar	

Figura 14 – Tela de Informações do balanço hídrico do módulo de dimensionamento do sistema de irrigação.

**Balanco Hídrico Diário**

Informações Resultados Tabelas Gráficos

Data da Colheita	Ciclo - dias	Yp kg/ha
15/03/1994	105	2279.53
ETo média - mm/dia	TR mínimo - dias	Yi kg/ha
3.84	16	2271.78
ETp máxima - mm/dia	Pe mínima - mm/periodo	
3.62	0.00	
ETc média - mm/dia	Vv média - (m/s)/dia	
2.71	1.70	
ETs total - mm/ciclo	f médio - adm/dia	
281.83	0.73	

OK Cancelar

Figura 15 – Tela de resultados do balanço hídrico do módulo de dimensionamento do sistema de irrigação.

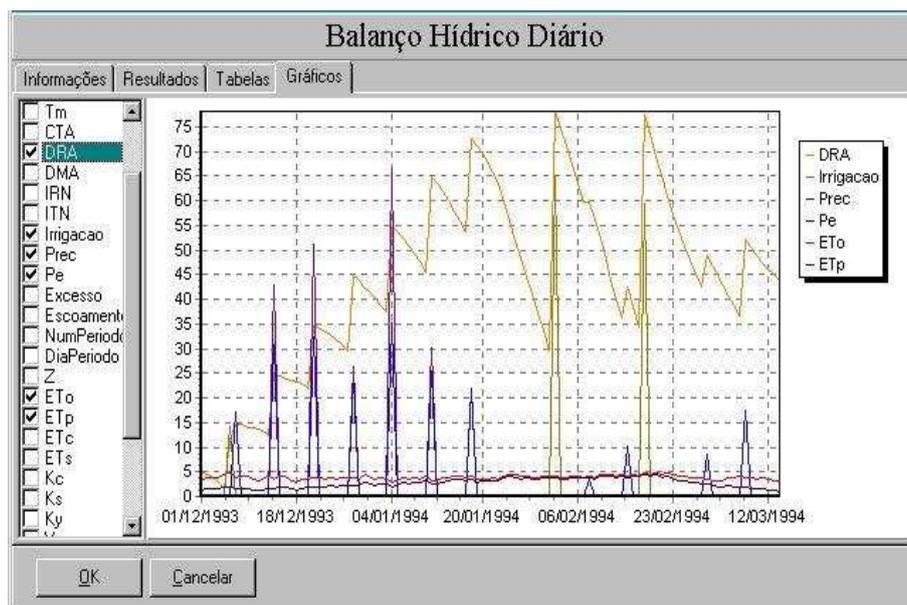


Figura 16 – Tela de resultados do balanço hídrico, vistos através de gráficos, no passo 2 do módulo de dimensionamento do sistema de irrigação.

No passo 3, Necessidade de irrigação, Figura 17, o programa calcula a irrigação necessária, de modo que a produtividade da cultura não seja afetada, com base nas características físico-hídricas do solo, no fator de disponibilidade de água no solo, na profundidade efetiva das raízes da cultura, na

evapotranspiração máxima da cultura, na precipitação efetiva e na necessidade de lixiviação de sais no solo. Nesse passo, o programa calcula o turno de rega, o período de irrigação e a irrigação total necessária, assumindo uma eficiência de aplicação de 80 %. Essa eficiência será posteriormente ajustada quando da escolha do aspersor. Os campos são preenchidos automaticamente com as informações dos passos 1 e 2. Alguns campos podem ser alterados pelo projetista.

**Passo 3 - Necessidade de Irrigação**

DTA - mm/cm	Cc - % peso	Pm - % peso	' $\rho$ ' - g/cm <sup>3</sup>	VIB - mm/h
2.34	38.00	18.00	1.17	12.00
CTA - mm	Z - cm			
81.90	35.00			
CRA - mm	f - dec			
34.40	0.42			
TR - dias	ETp - mm	Pe - mm		
5.00	7.20	0.00		
IRN - mm	Pi - dias			
34.40	5.00			
ITN - mm	Emp - dec	RL - dec		
43.00	0.80	0.00		

← Anterior      Próximo →      Salvar      Sair

Figura 17 – Tela dos parâmetros necessários à irrigação (módulo de dimensionamento do sistema de irrigação).

No passo 4, Escolha do aspersor, Figura 18, o programa calcula a intensidade de aplicação de água do aspersor, em função da irrigação total necessária e do tempo efetivo de irrigação por posição, limitado ao valor máximo correspondente à VIB. Seleciona o aspersor, a partir de uma consulta ao banco de dados disponível, informando o espaçamento entre aspersores e linhas laterais, a vazão e a pressão do aspersor, a eficiência da menor mediana, a eficiência de condução do sistema, e o CUC, estimado em 80 %. Se o projetista dispuser de dados de um teste de avaliação, realizado nas condições do projeto, ele pode fornecer os valores reais do CUC e das perdas por evaporação e arraste pelo vento, ou fornecer os dados de precipitação do aspersor e o modelo simula o perfil de distribuição da precipitação do aspersor. Com esses dados pode ser simulado o CUC e o CUD, para diferentes condições operacionais de vento, espaçamento entre aspersores e entre laterais, declividade do solo, pressão de operação do aspersor, vazão, ângulo do bocal do aspersor, altura da haste do aspersor e altura da cultura.

**Passo 4 - Escolha do Aspersor**

Ia - mm/h: 5.02    Tip - horas: 9.00    VIB - mm/h: 12.00    ITN - mm: 45.15    Pev - dec:    Ha - m: 2.00    CUC - dec: 0.80  
 Em - adm: 0.76    Ec - adm: 0.99    Qa - m3/h: 1.63    Pa - atm: 3.34    Ll - m: 279.00    Lp - m: 711.00    S1 - m: 18.00    S2 - m: 18.00

Ia - mm/h de: 3.78    até: 5.78    Fabricante: Asbrasil    ? Consultar    Escolher    Yr...

Ia - mm/h	Nome	Qac - m3/h	Pac - atm	S1 - m	S2 - m	CUC - adm	DB1 - mm	DB2 - mm
4.41	Asbrasil ZE-30 4.5 x 0.0	1.43	3.50	18.0	18.0	0.80	4.500	0.000
4.49	Asbrasil ZA-30 3.8 x 0.0	0.97	3.50	12.0	18.0	0.80	3.800	0.000
4.72	Asbrasil ZE-30 4.5 x 0.0	1.53	4.00	18.0	18.0	0.80	4.500	0.000
4.75	Asbrasil ZE-30 5.0 x 0.0	1.54	3.00	18.0	18.0	0.80	5.000	0.000
5.07	Asbrasil ZA-30 3.8 x 0.0	0.73	2.00	12.0	12.0	0.80	3.800	0.000
5.12	Asbrasil ZE-30 5.0 x 0.0	1.66	3.50	18.0	18.0	0.80	5.000	0.000
5.32	Asbrasil ZE-30 6.0 x 0.0	2.30	3.00	18.0	24.0	0.80	6.000	0.000

Anterior    Próximo    Salvar    Sair

Figura 18- Tela de escolha do aspersor utilizando banco de dados e informações de projeto.

No passo 5, Laterais por posição, Figura 19, o programa calcula o número de linhas laterais do projeto, o número de aspersores por lateral, o número de aspersores do projeto e a vazão do sistema.

Tid - horas	Npd	Tmp - horas	Tip - horas
18.00	2.00	1.00	9.00
Qm - m3/h	Área - m2	ITN - mm	Pi - dias
208.07	414720.00	45.15	5.00
Ni	Nap	Nal	Qs - m3/h
9.00	135.00	15.00	219.44

Anterior Próximo Salvar Sair

Figura 19 – Tela de cálculo do número de laterais, número de aspersores por linha e por posição.

No passo 6, Diâmetro da linha lateral, Figura 20, o programa informa a perda de carga admissível na linha lateral e calcula o diâmetro da tubulação com base no material a ser utilizado no projeto e na variação de pressão permitida.

**Passo 6 - Diâmetro da Linha Lateral**

hfl - mca     DNI - m     Pa - atm

DI - m     QI - m<sup>3</sup>/h     C - adm     Material da Lateral

Figura 20 – Tela de cálculo do diâmetro e da perda de carga admissível na linha lateral.

No passo 7, Escolha da tubulação das laterais, Figura 21, o programa permite trabalhar com um e com dois diâmetros na linha lateral, calculando o comprimento de cada trecho e sua respectiva perda de carga. Calcula ainda a perda de carga total na linha, bem como a pressão na entrada da linha lateral.

**Passo 7 - Escolha da Tubulação das Laterais**

N° de Diâmetros:  1     2

DI - m     LI - m     hfl - mca

Escolher DI 1    DI 1 - m     LI 1 - m     hfl 1 - mca

Escolher DI 2    DI 2 - m     LI 2 - m     hfl 2 - mca

Pin - atm     hfl T - mca

Fabricante     Material    

Nome	DIerno - m	DComercial - m	Preco - R\$	CompPadrao - m
Tubo Asbrasil eng rápido	0.048	0.050	35.00	6.00
▶ Tubo Asbrasil eng rápido	0.068	0.063	38.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.087	0.075	40.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.106	0.100	50.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.130	0.125	70.00	6.00

Figura 21 – Tela de dimensionamento da linha lateral com 2 diâmetros de tubulação.

No passo 8, Trechos da linha principal, o programa determina os trechos da linha principal, com base no número de laterais do projeto, informando o comprimento do trecho, a vazão do trecho e o comprimento da linha principal. Nesse passo, o projetista pode alterar os dados sugeridos pelo programa.

Trecho	Qt - m3/h	Lt - m
1	199.49	90.00
2	177.33	90.00
3	155.16	90.00
4	133.00	72.00
5	110.83	72.00
6	88.66	72.00
7	66.50	72.00
8	44.33	72.00

Figura 22- Tela com número, comprimento e vazão dos trechos da linha principal.

No passo 9, Seleção dos diâmetros da linha principal, Figura 23, o programa já sugere os limites mínimos e máximos dos diâmetros a serem selecionados para a linha principal, com base na velocidade de escoamento. A partir do banco de dados de tubulações existente no programa, o projetista escolhe os diâmetros da tubulação, a serem utilizados na análise econômica.



Figura 23 – Tela de seleção, a partir do banco de dados, dos tubos para otimização da linha principal.

No passo 10, Diâmetros da linha principal, Figura 24, o programa determina a configuração de diâmetros a serem utilizados em cada trecho da linha principal. Calcula suas respectivas perdas de carga, que proporcionam o menor custo, e ainda, a perda de carga total da linha. O projetista deve preencher os campos referentes às tarifas de ICMS cobrado na região, de consumo de energia elétrica e demanda de potência elétrica, se o motor for elétrico, ou o preço do litro de óleo diesel. Deve fornecer também os valores da taxa de juro anual, da vida útil do equipamento, e ainda, os limites de velocidade da água desejados na tubulação. Neste aspecto, o programa apresenta como padrão, as velocidades de  $1 \text{ m s}^{-1}$ , mínima, e  $2 \text{ m s}^{-1}$ , máxima. O projetista pode alterar esses valores, dentro dos limites de  $0,6$  a  $2,5 \text{ m s}^{-1}$ .

### Passo 10 - Diâmetros da Linha Principal

**Tarifas**

Consumo - R\$/kWh:

Demanda - R\$/kW:

ICMS - adm:

Preço Diesel - R\$/litro:

**Sistema**

TAJ - adm:

VU - anos:

HoAno - horas/ano:

Sp - m/m:

DNp - m:

Dimensionar Economicamente Dp...

Vel. Mínima:  Vel. Máxima:  hfp - mca:

Trecho	Qt - m <sup>3</sup> /h	Lt - m	Hft - mca	Vt - m/s	D. Comer. - m	D. Inter. - m
1	199.49	90.00	1.64	1.76	0.200	0.200
2	177.33	90.00	1.32	1.57	0.200	0.200
3	155.16	90.00	1.03	1.37	0.200	0.200
4	133.00	72.00	0.62	1.18	0.200	0.200
5	110.83	72.00	1.63	1.67	0.150	0.153
6	88.66	72.00	1.08	1.34	0.150	0.153

← Anterior
Próximo →
Salvar
Sair

Figura 24 – Tela com vazão, comprimento, perda de carga, velocidade e diâmetro de cada trecho da linha principal.

No passo 11, Linhas de recalque e sucção, Figura 25, o programa sugere e escolhe o diâmetro da tubulação de recalque e calcula a respectiva perda de carga da tubulação. O diâmetro da linha de sucção é o imediatamente superior ao da linha de recalque, disponível no banco de dados de tubulações. Nesse passo, o projetista deve fornecer os comprimentos e os desníveis geométricos das tubulações de recalque e de sucção.

**Passo 11 - Linhas de Recalque e Sucção**

Escolhar D<sub>r</sub>      D<sub>r</sub> - m: 0.200      L<sub>r</sub> - m: 90.00      DN<sub>r</sub> - m: 4.50      h<sub>fr</sub> - mca: 1.95  
 Escolhar D<sub>s</sub>      D<sub>s</sub> - m: 0.200      L<sub>s</sub> - m: 8.00      DN<sub>s</sub> - m: 4.00      h<sub>fs</sub> - mca: 0.17

Fabricante: Asbrasil      Material: Aço Zincado     

Nome	D <sub>Interno</sub> - m	D <sub>Comercial</sub> - m	Preço - R\$	CompPadrao - m
▶ Tubo Asbrasil eng rápido	0.048	0.050	R\$35.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.068	0.063	R\$38.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.087	0.075	R\$40.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.106	0.100	R\$50.00	6.00
Tubo Asbrasil eng rápido	0.130	0.125	R\$70.00	6.00

Figura 25 – Tela de dimensionamento das linhas de sucção e recalque.

No passo 12, Peças especiais, Figura 26, o programa permite consulta ao banco de dados de peças especiais, dando oportunidade ao projetista/usuário de listar as quantidades e as peças utilizadas no projeto. O programa calcula a perda de carga localizada, por peça, e acumula seus valores, permitindo assim o cálculo da perda de carga localizada total.

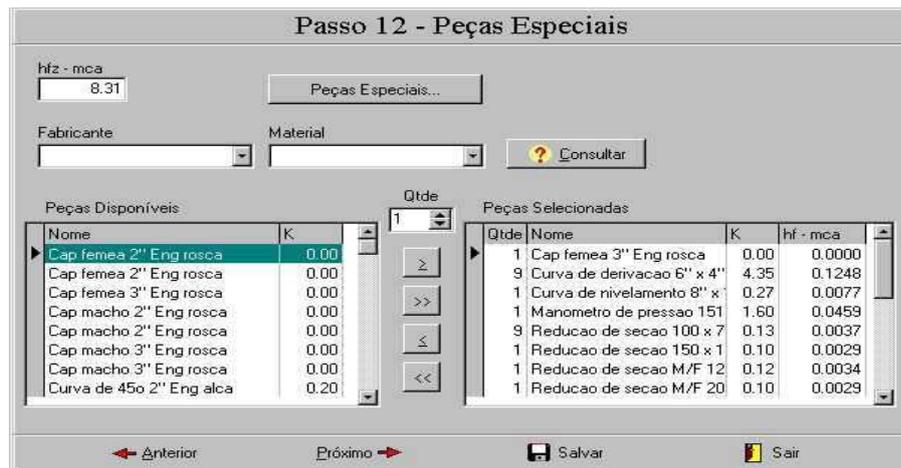


Figura 26 – Tela de seleção, a partir do banco de dados, das peças especiais do projeto.

No passo 13, Altura manométrica total, Figura 27, o programa calcula a altura manométrica total do projeto, que é a altura correspondente à pressão máxima que a bomba deve fornecer. Neste passo, o projetista/usuário não interfere no programa. A altura manométrica é calculada com base nos dados dos campos da tela.

No passo 14, Escolha da bomba, Figura 28, com base nos dados de altura manométrica total e vazão do sistema e ainda, no banco de dados disponíveis de bombas centrífugas, o usuário escolhe a bomba que opera com o melhor rendimento e sua respectiva potência.

### Passo 13 - Altura Manométrica Total

Hm - mca <input type="text" value="100.50"/>	DNp - m <input type="text" value="35.55"/>	hfp - mca <input type="text" value="8.71"/>
	DNr - m <input type="text" value="4.50"/>	hfr - mca <input type="text" value="1.95"/>
	DNs - m <input type="text" value="4.00"/>	hfs - mca <input type="text" value="0.17"/>
	Pin - atm <input type="text" value="3.73"/>	hfz - mca <input type="text" value="8.31"/>

← Anterior      Próximo →      Salvar      Sair

Figura 27 – Tela do cálculo da altura manométrica total.

### Passo 14 - Escolha da Bomba

Qs - m3/h <input type="text" value="219.44"/>	Hm - mca <input type="text" value="100.50"/>	
Pb - cv <input type="text" value="108.91"/>	Rb - dec <input type="text" value="0.75"/>	<input checked="" type="checkbox"/> Escolher

MaxBombas...  
Bombas...

Cod.	Nome	Modelo	Qb - m3/h	Pb - cv	Rb - adm	RPM - adm	Preço - R\$
24	Bomba centrífuga (Meganorm)	40-250	220.00	95.00	0.80	3500	R\$1,088.17
25	Bomba centrífuga (Meganorm)	40-315				3500	R\$1,267.62
26	Bomba centrífuga (Meganorm)	50-125				3500	R\$743.78
27	Bomba centrífuga (Meganorm)	50-160				3500	R\$771.27
28	Bomba centrífuga (Meganorm)	50-200				3500	R\$874.00
29	Bomba centrífuga (Meganorm)	50-250	120.00			3500	R\$1,128.69
30	Bomba centrífuga (Meganorm)	50-315				3500	R\$1,331.27

← Anterior      Próximo →      Salvar      Sair

Figura 28 – Tela de escolha da bomba do sistema de irrigação.

No passo 15, Escolha do motor, Figura 29, o programa informa a potência e o rendimento da bomba e sugere a potência mínima do motor a ser utilizado naquela bomba. Utilizando o banco de dados disponível de motores, o projetista escolhe o motor que forneça o melhor rendimento.

**Passo 15 - Escolha do Motor**

Pb - cv:       Rb - dec:       Psm - cv:

Pm - cv:       Rm - dec:        Escolher

Cod.	Nome	Modelo	Pm - cv	Rm - adm	Fase	Polo	Fator Potência
434	Weg Trifásico 4 polos, Rm 93%	250S/M	100.00	92.50	3	4	0.87
435	Weg Trifásico 4 polos, Rm 89%	280S/M	125.00	89.30	3	4	0.80
436	Weg Trifásico 4 polos, Rm 91%	280S/M	125.00	91.00	3	4	0.85
437	Weg Trifásico 4 polos, Rm 92%	280S/M	125.00	91.80	3	4	0.87
438	Weg Trifásico 4 polos, Rm 89%	280S/M	150.00	89.00	3	4	0.82
439	Weg Trifásico 4 polos, Rm 91%	280S/M	150.00	91.30	3	4	0.87

Figura 29 – Tela de escolha do motor elétrico do sistema de irrigação.

No passo 16, Custo da mão-de-obra, o programa calcula o custo da mão-de-obra utilizada no projeto, a partir das informações fornecidas pelo usuário.

**Passo 16 - Custo da Mão-de-Obra**

Mão-de-Obra - R\$/ciclo:       Nll - adm:       Nlp - adm:

Npd - adm:       Nda - dias:

Nht - horas:       Nhd - horas/dia:

Diária - R\$/dia:

Figura 30 – Tela de custo da mão-de-obra utilizada nas irrigações durante o ciclo da cultura.

No passo 17, Relatório do projeto, pode-se visualizar o relatório completo do projeto, incluindo número e custo de aspersores, número e custo de

tubos das linhas lateral, principal, recalque e sucção, número e custo de peças especiais, custo da bomba e do motor, custo da mão-de-obra, custo total do projeto e custo do projeto por hectare. O relatório final pode ser salvo e impresso, conforme modelo apresentado a seguir.

## ASPERSOR - Sistema Dimensionador e Simulador de Irrigação por Aspersão

Projeto Projeto Tese  
 Propriedade Propriedade Tese  
 Proprietário João Hélio Torres D'Ávila  
 Data Projeto 31/08/2000

### Aspersor

Aspersor Asbrasil ZE-30 5.0 x 0.0  
 Preço Unitário R\$ 23,00  
 Número de Aspersores 165  
 Preço dos Aspersores R\$ 3.795,00

### 1° Trecho da Lateral

Tubulação Tubo Asbrasil engate rápido  
 Diâmetro - m 0.075  
 Preço Unitário R\$ 40,00  
 Número de Tubos 50  
 Preço dos Tubos R\$ 1.980,00

### 2° Trecho da Lateral

Tubulação Tubo Asbrasil engate rápido  
 Diâmetro - m 0.063  
 Preço Unitário R\$ 38,00  
 Número de Tubos 462  
 Preço dos Tubos R\$ 17.556,00

### Peças Especiais

Nome	P. Unit	Unidades	Preço
Cap fêmea 3" Eng rosca	R\$ 7,28	1	R\$ 7,28
Curva de derivação 6" x 4" Eng alça	R\$ 65,15	9	R\$ 586,35
Curva de nivelamento 8" x 1.40 m	R\$ 157,48	1	R\$ 157,48
Manômetro de pressão 151 lb	R\$ 14,57	1	R\$ 14,57
Redução de seção 100 x 75 Eng alça	R\$ 35,56	9	R\$ 320,04
Redução de seção 150 x 125 Eng alça	R\$ 61,33	1	R\$ 61,33
Redução de seção M/F 125 x 100 Eng alça	R\$ 32,80	1	R\$ 32,80
Redução de seção M/F 200 x 150 Eng alça	R\$ 78,74	1	R\$ 78,74
Registro gaveta 6" 100 % aberto	R\$ 711,00	1	R\$ 711,00
Saída para aspersor 3" x 1" Eng alça	R\$ 21,33	117	R\$ 2.495,61
Saída para aspersor 4" x 1" Eng alça	R\$ 34,67	18	R\$ 624,06
Válvula de linha 6" x 4" Eng alça	R\$ 112,00	9	R\$ 1.008,00
Válvula de pé 8" com crivo (rosca)	R\$ 256,05	1	R\$ 256,05

Total das Peças R\$ 6.353,31

### Recalque

Tubulação Tubo Asbrasil engate rápido  
 Diâmetro - m 0.2  
 Preço Unitário R\$ 150,00  
 Número de Tubos 15

Preço dos Tubos	R\$ 2.250,00	
Sucção		
Tubulação	Tubo Asbrasil engate rápido	
Diâmetro - m	0.200	
Preço Unitário	R\$ 150.00	
Número de Tubos	1	
Preço dos Tubos -	R\$ 200.00	
Bomba		
Nome	Bomba centrífuga (Meganorm)	
Potência - W		
Preço R\$	R\$ 1.212,61	
Motor		
Nome	Weg Trifásico 4 polos, Rm 92%	
Potência - W	125	
Preço R\$	R\$ 2,400.00	
Mão de Obra		
Custo	R\$ 125.00	
Custo Total do Projeto	R\$ 35.871,92	R\$ 864,97/ha

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de testar o modelo computacional, comparou-se os dados simulados pelo modelo com dados reais medidos por PEREIRA (1995). Foram consideradas a velocidade e direção do vento e declividade da superfície do solo para um aspersor de impacto, de média pressão, modelo NAAN-5035, com ângulo de inclinação de  $27^\circ$  e diâmetros de bocais de 2,5 e 5 mm, altura da haste de 1,5 m, operando com pressão de serviço de 350 kPa e vazão de  $2,1 \text{ m}^3 \text{ h}$ .

Nos Quadros 4 e 5 são apresentados, respectivamente, os dados medidos e os simulados pelo programa, dos valores das precipitações do aspersor, operando em condição padrão de declividade nula e ausência de vento. Observa-se que os valores obtidos na simulação foram próximos dos verificados no teste de campo, apresentando, em média, um erro relativo de 5,8 %, quando se analisou o quadrante inferior direito, aleatoriamente escolhido.

Na Figura 31 são apresentados os valores reais e simulados do perfil longitudinal do aspersor para o teste realizado em condição padrão de declividade nula e ausência de vento. Observa-se que existe uma superposição quase total das curvas que representam as condições medida e simulada, com uma pequena diferença na extremidade final do gráfico, fazendo com que se possa afirmar que o modelo se comportou muito bem nessa condição.

Quadro 4 - Dados reais normalizados de precipitação (ml) do aspersor NAAN-5035 operando em condições de vento nulo e declividade zero, para coletores espaçados de 3 m

0	0	0	0	0	0	7	9	9	5	0	0	0	0	0	0
0	0	0	3	10	13	16	17	17	16	15	10	6	0	0	0
0	0	3	10	17	19	20	23	22	22	20	19	15	6	0	0
0	0	9	16	21	24	26	28	29	27	24	22	20	15	0	0
0	5	14	23	28	30	30	31	32	31	29	27	22	20	11	0
0	14	18	23	29	32	33	29	30	30	31	30	24	21	15	0
6	12	20	24	30	35	31	33	32	32	35	32	27	22	15	7
7	13	20	26	32	36	31	30	30	28	30	32	27	23	17	8
8	14	20	25	32	36	34	32	33	32	33	33	28	23	17	9
5	12	18	24	29	36	36	34	34	34	35	32	25	22	15	7
0	10	16	21	26	32	35	35	36	36	34	28	24	20	14	0
0	6	13	19	24	26	30	31	32	31	28	24	21	18	9	0
0	0	7	17	20	21	23	24	25	24	23	22	18	12	0	0
0	0	2	8	14	17	21	20	23	21	19	16	13	4	0	0
0	0	0	3	5	10	13	15	16	15	13	9	2	0	0	0
0	0	0	0	0	2	5	8	8	5	0	0	0	0	0	0

● aspersor

Quadro 5 - Precipitação normalizada (ml) simulada pelo modelo computacional, do aspersor NAAN-5035 operando em condições de vento nulo e declividade zero

0	0	0	0	0	0	0	7.8	7.8	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	8.1	12.7	14.5	15.7	15.7	14.5	12.7	8.1	0	0	0	0
0	0	0	11.1	15.8	18.7	20.8	21.5	21.5	20.8	18.7	15.8	11.1	0	0	0
0	0	11.1	17.4	20.8	24	26.2	26.8	26.8	26.2	24	20.8	17.4	11.1	0	0
0	8.1	15.8	20.8	25.5	27.8	30.5	31.8	31.8	30.5	27.8	25.5	20.8	15.8	8.1	0
0	12.7	18.7	24	27.8	31.8	33.1	33.3	33.3	33.1	31.8	27.8	24	18.7	12.7	0
0	14.5	20.8	26.2	30.5	33.1	33	32.4	32.4	33	33.1	30.5	26.2	20.8	14.5	0
7.8	15.7	21.5	26.8	31.8	33.3	32.4	31.3	31.3	32.4	33.3	31.8	26.8	21.5	15.7	7.8
7.8	15.7	21.5	26.8	31.8	33.3	32.4	31.3	31.3	32.4	33.3	31.8	26.8	21.5	15.7	7.8
0	14.5	20.8	26.2	30.5	33.1	33	32.4	32.4	33	33.1	30.5	26.2	20.8	14.5	0
0	12.7	18.7	24	27.8	31.8	33.1	33.3	33.3	33.1	31.8	27.8	24	18.7	12.7	0
0	8.1	15.8	20.8	25.5	27.8	30.5	31.8	31.8	30.5	27.8	25.5	20.8	15.8	8.1	0
0	0	11.1	17.4	20.8	24	26.2	26.8	26.8	26.2	24	20.8	17.4	11.1	0	0
0	0	0	11.1	15.8	18.7	20.8	21.5	21.5	20.8	18.7	15.8	11.1	0	0	0
0	0	0	0	8.1	12.7	14.5	15.7	15.7	14.5	12.7	8.1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	7.8	7.8	0	0	0	0	0	0	0

● aspersor

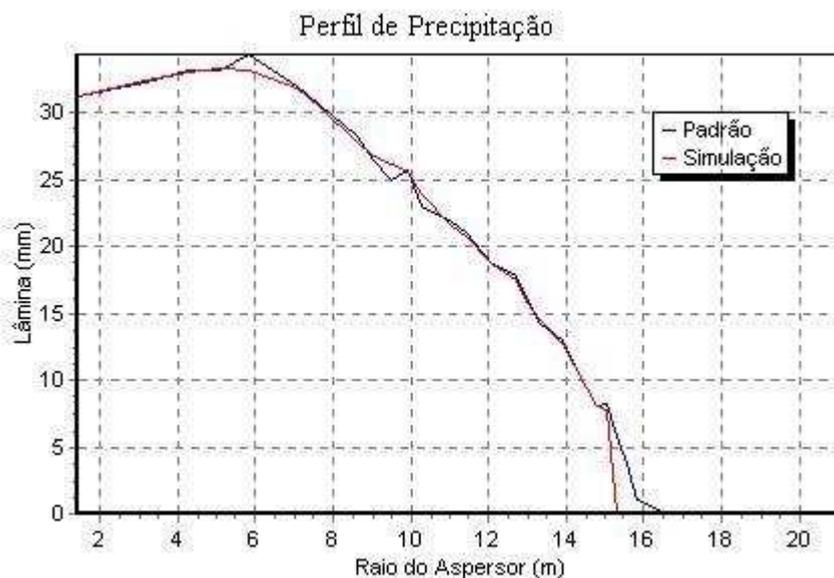


Figura 31 - Valores medidos e simulados do perfil longitudinal do aspersor, operando em condições de declividade nula e ausência de vento.

Objetivando, ainda, testar o modelo computacional, comparou-se os dados simulados pelo modelo, com dados reais obtidos em testes realizados no Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, considerando a velocidade e a direção do vento para um aspersor de impacto, de média pressão, modelo FABRIMAR A1823M, com ângulo de inclinação de  $23^\circ$  e diâmetros de bocais de 4 e 4,8 mm, altura da haste de 1,5 m, operando com pressão de serviço de 303,9 kPa e vazão de  $2,52 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

Nos Quadros 6 e 7 são apresentados, respectivamente, os dados reais e os simulados pelo programa, da precipitação em valores normatizados, divididos pela média, para o aspersor, operando em condição de declividade nula e velocidade de vento muito baixa ( $0,7$  a  $0,8 \text{ m s}^{-1}$ ).

Para a velocidade de vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$  e espaçamento entre aspersores de  $18 \times 18 \text{ m}$  os valores de CUC, medidos e simulados, foram de 86,4% e 86,6%, respectivamente.

No Quadro 8 são apresentados os valores do CUC, medidos e simulados, para diferentes espaçamentos, na condição do teste acima mencionada.

A Figura 32 são apresentados os valores normalizados medidos e simulados do perfil longitudinal do aspersor, para o teste realizado em condição padrão de declividade nula e quase ausência de vento. Os resultados mostraram que houve uma relação bem próxima entre os valores reais e os valores simulados de CUC.

QUADRO 6 - Precipitação real, em valores normalizados, do aspersor FABRIMAR A1823M, operando em condições de velocidade de vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$  e declividade zero

0,0	0,0	0,0	0,6	0,6	0,7	0,5	0,1	0,0	0,0
0,0	0,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,4	0,0
0,0	0,8	1,0	1,4	1,4	1,5	1,4	1,1	0,7	0,2
0,1	1,0	1,5	1,6	1,7	1,6	1,5	1,4	0,9	0,5
0,3	1,0	1,6	1,8	1,4	1,4	1,5	1,6	1,1	0,6
0,2	0,9	1,7	2,1	1,7	1,6	2,0	1,8	1,0	0,6
0,1	0,8	1,3	1,9	2,1	2,2	2,2	1,5	0,9	0,3
0,0	0,4	0,8	1,2	1,6	1,7	1,3	0,9	0,6	0,0
0,0	0,0	0,4	0,7	0,9	0,9	0,8	0,5	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0

● aspersor

QUADRO 7 - Precipitação simulada, em valores normalizados, pelo aspersor FABRIMAR A1823M, operando em condições de velocidade de vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$  e declividade zero

0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,6	0,5	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,6	0,9	1,1	1,1	1,0	0,8	0,4	0,0
0,0	0,5	0,9	1,4	1,7	1,7	1,6	1,2	0,8	0,2
0,0	0,8	1,3	1,8	1,8	1,8	1,8	1,6	1,0	0,5
0,2	0,9	1,5	1,8	1,6	1,6	1,8	1,7	1,1	0,6
0,2	0,8	1,4	1,8	1,6	1,5	1,8	1,7	1,1	0,6
0,0	0,7	1,1	1,6	1,8	1,8	1,8	1,4	0,9	0,4
0,0	0,3	0,8	1,2	1,4	1,5	1,3	1,0	0,7	0,0
0,0	0,0	0,3	0,7	0,9	0,9	0,8	0,6	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0

● Aspersor

Quadro 8 - Coeficientes de uniformidade de Christiansen, CUC, medidos e simulados, obtidos na condição de declividade do terreno nula e velocidade do vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$ , com o aspersor Fabrimar A1823M

Espaçamento (m)	CUC medido (%)	CUC simulado (%)
18 x 18	86,4	86,6
18 x 24	75,8	74,5
24 x 24	69,0	66,2

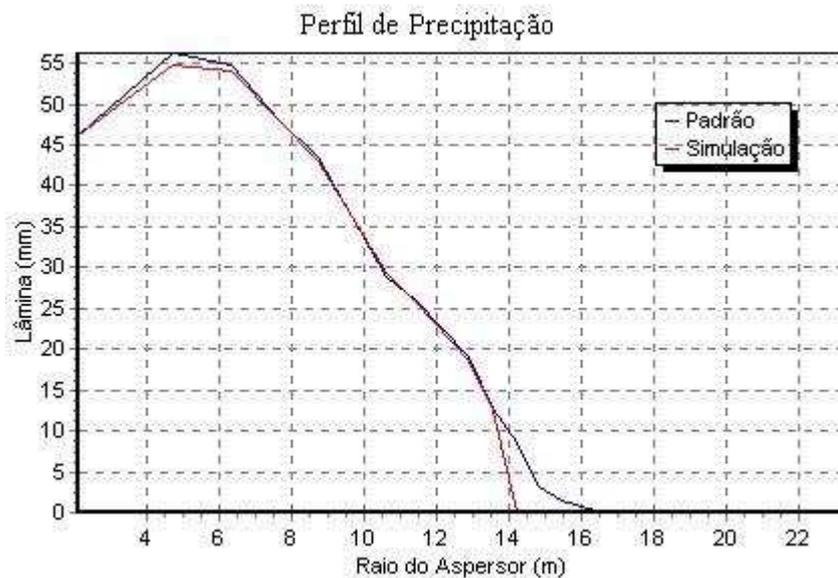


Figura 32 – Perfis de distribuição de água do aspersor FABRIMAR A1823M, medido e estimado, operando em condições de declividade nula e velocidade de vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$ .

#### 4.1. Vento

Na Figura 33 são apresentados os perfis de distribuição das gotas de água na superfície do solo, mostrando o efeito da velocidade e da direção do vento sobre a distribuição das gotas de água no solo, para a condição de velocidade do vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$  (azul) e para velocidade de vento de  $3 \text{ m s}^{-1}$  (vermelho), com direção de  $40^\circ$  em relação à linha de aspersores.

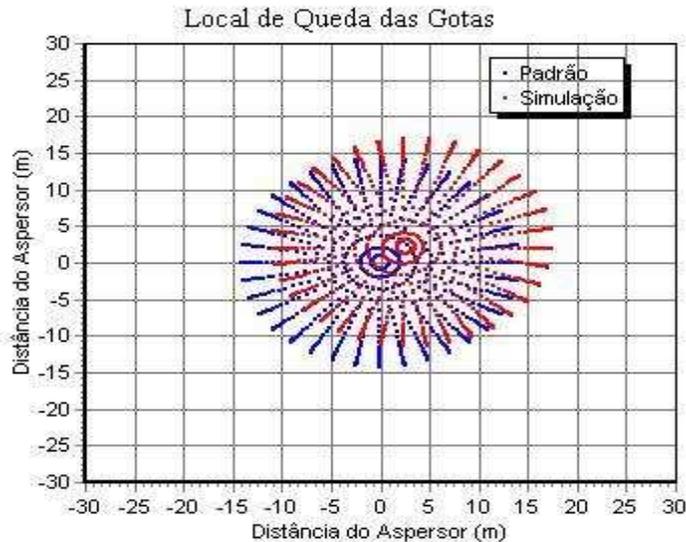


Figura 33 - Distribuição das gotas de água na superfície do solo para velocidades de vento de  $0,75 \text{ m s}^{-1}$  e  $3 \text{ m s}^{-1}$ , com direção de  $40^\circ$  em relação à linha de aspersores.

Observa-se que houve distorção na distribuição das gotas de água pelo aspersor, com arrastamento das gotas na direção do vento, criando assim uma nova área de molhamento. Esta distorção aumenta com a velocidade do vento.

O modelo computacional ASPERSOR mostra, através da distribuição das gotas sob a ação do vento, que existe uma relação direta entre a distância do aspersor ao centro de gravidade do modelo de distribuição de água. Este incremento na distância, de acordo com TARJUELO et al. (1999), em média, é de  $1,25 \text{ m}$  para cada incremento de  $1 \text{ m s}^{-1}$  na velocidade do vento. Se o aspersor estiver colocado a  $2 \text{ m}$  de altura, o incremento na distância será maior.

#### 4.1.1. Efeito da velocidade do vento

Utilizando-se os dados de precipitação do aspersor NAAN-5035, com ângulo de inclinação de  $27^\circ$  e diâmetros de bocais de  $2,5 \text{ mm}$  e  $5 \text{ mm}$ , altura da haste de  $1,5 \text{ m}$ , pressão de serviço de  $350 \text{ kPa}$ , operando sob condições de velocidade do vento de  $0, 1, 2, 3, 4$  e  $5 \text{ m s}^{-1}$ , calculou-se o coeficiente de uniformidade para os espaçamentos de  $12 \times 18$  e  $18 \times 18 \text{ m}$ . Os resultados são apresentados na

Figura 34. Para os espaçamentos de 12 x 18 m e 18 x 24 m, o melhor coeficiente de determinação,  $R^2$ , foi obtido com equação polinomial de 2º grau, enquanto que para o espaçamento 18 x 18 m o melhor coeficiente de determinação,  $R^2$ , foi obtido com equação polinomial de 3º grau. Os valores de  $R^2$  e as equações de ajuste, para os espaçamentos de 12 x 18m e 18 x 24 m estão na Figura 34.

Estes resultados estão em concordância com os obtidos por GOMIDE et al. (1980) e TARJUELO et al. (1992), que realizaram experimentos de campo para estudar a influência do vento na uniformidade de distribuição e também observaram uma relação quadrática entre o CUC e a velocidade do vento. Mas, TARJUELO et al. (1999), em testes de campo realizados, encontraram que os melhores coeficientes de determinação,  $R^2$ , foram obtidos com equações polinomiais de 3º grau, devido ao fato de a velocidade do vento apresentar efeito negativo sobre os valores de CUC e CUD, acima de uma velocidade mínima de aproximadamente  $2 \text{ m s}^{-1}$ .

Observa-se também na Figura 34 que o coeficiente de uniformidade diminui com o aumento do espaçamento entre aspersores, como geralmente é esperado.

PAZ (1990), SOLOMON (1979), e VON BERNUTH e SEGNER (1990) observaram uma relação linear entre a velocidade do vento e o coeficiente de uniformidade (CUC).

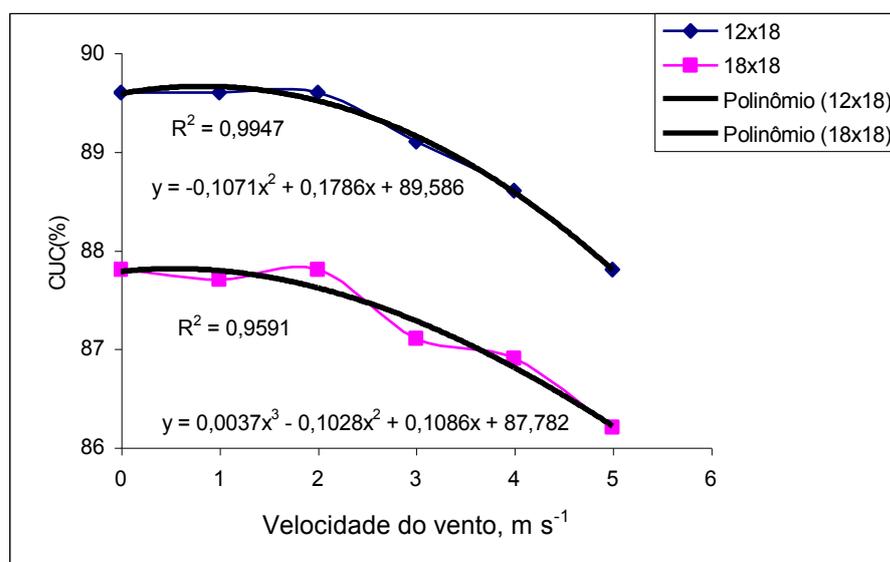


Figura 34 - Variação do CUC com a velocidade do vento para o aspersor NAAN-5035, no espaçamento de 12 x 18 e 18 x 18 m.

Nas Figuras 35 e 36, observam-se os perfis longitudinais simulados e medidos para velocidades de vento de 3 e 4,2 m s<sup>-1</sup>, respectivamente, do aspersor modelo FABRIMAR A1823M, com ângulo de inclinação de 23° e diâmetros de bocais de 4 e 4,8 mm, altura da haste de 1,5 m, operando com pressão de serviço de 303,9 kPa e vazão de 2,52 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

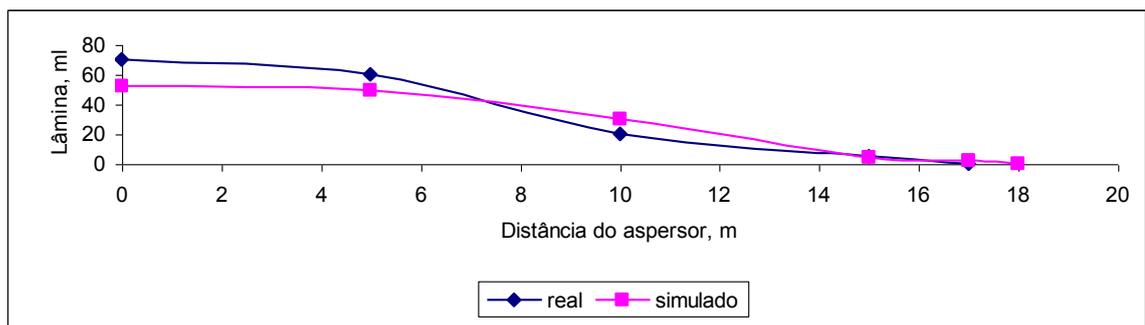


Figura 35 - Perfis longitudinais de precipitação simulados e medidos do aspersor FABRIMAR A1823M para velocidade de vento = 3 m s<sup>-1</sup>, e sentido do vento com o eixo X = 40°.

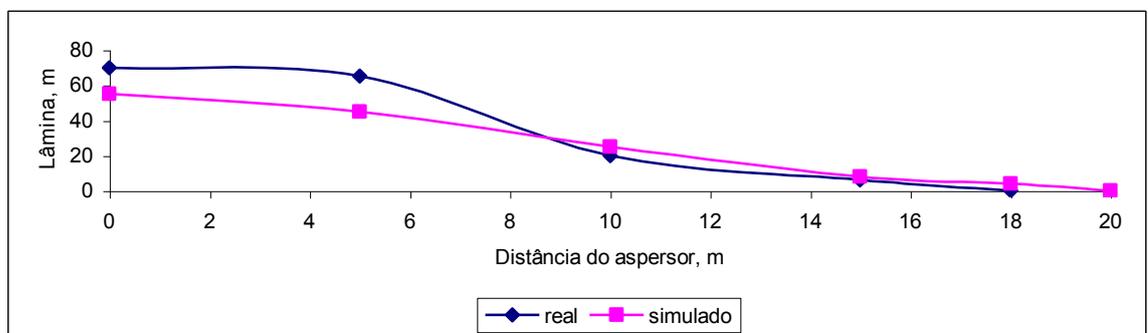


Figura 36 - Perfis longitudinais de precipitação simulados e medidos do aspersor FABRIMAR A1823M para velocidade de vento = 4,2 m s<sup>-1</sup>, e sentido do vento com o eixo X = 40°.

Analisando-se as Figuras 35 e 36, verifica-se que o modelo simulou relativamente bem o efeito do vento sobre o perfil longitudinal de precipitação do aspersor, com exceção da área próxima ao aspersor. Vale ressaltar que não se conseguiu a condição ideal de vento nulo para o teste padrão, pois durante o teste a velocidade média do vento foi de 0,75 m s<sup>-1</sup>, fazendo com que a malha de

precipitação do aspersor fosse alterada. E ainda, durante a realização do teste de campo a velocidade e a direção do vento não foram constantes, como é considerado na simulação, que utiliza o valor médio da velocidade e a direção predominante do vento. Este fato diminui a possibilidade de prever com exatidão os resultados simulados.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por PEREIRA (1995), que apresentou os valores de CUC, medidos e simulados, para o aspersor NAAN-5035.

No Quadro 9, comparam-se os valores simulados de CUC obtidos por PEREIRA (1995) e pelo modelo ASPERSOR, com os valores medidos, utilizando o aspersor NAAN 5035. Pode-se afirmar que, qualitativamente, os dados obtidos pelo modelo são mais precisos do que os obtidos por PEREIRA (1995), pois estão mais próximos dos valores medidos.

Quadro 9 - Coeficientes de uniformidade de Christiansen, CUC, medidos e simulados, obtidos por PEREIRA (1995) e pelo modelo ASPERSOR, em função da velocidade e direção do vento e do espaçamento entre aspersores

Espaçamento (m)	Velocidade do Vento ( $m s^{-1}$ )	Direção do Vento ( $^{\circ}$ )	CUC (%) Medido	CUC (%) (PEREIRA)	CUC (%) ASPERSOR
18 x 18	1,1	210	87	89	87
18 x 24	1,1	210	82	81	80
18 x 18	1,8	220	88	86	85
18 x 24	1,8	220	79	80	79
18 x 18	2,1	15	87	88	86
18 x 24	2,1	15	77	81	78
18 x 18	2,5	200	85	86	85
18 x 24	2,5	200	71	81	76

Na Figura 37, observam-se as uniformidades simuladas (S) e medidas (M) para a condição padrão (CPS e CPM, respectivamente) e para velocidades de vento de 3 e 4  $m s^{-1}$ , (S3 e M3, e S4 e M4, respectivamente), do aspersor modelo FABRIMAR A1823M, com ângulo de inclinação de 23 $^{\circ}$  e diâmetros de bocais de

4 e 4,8 mm, altura da haste de 1,5 m, operando com pressão de serviço de 303,9 kPa, e vazão de 2,52 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>.

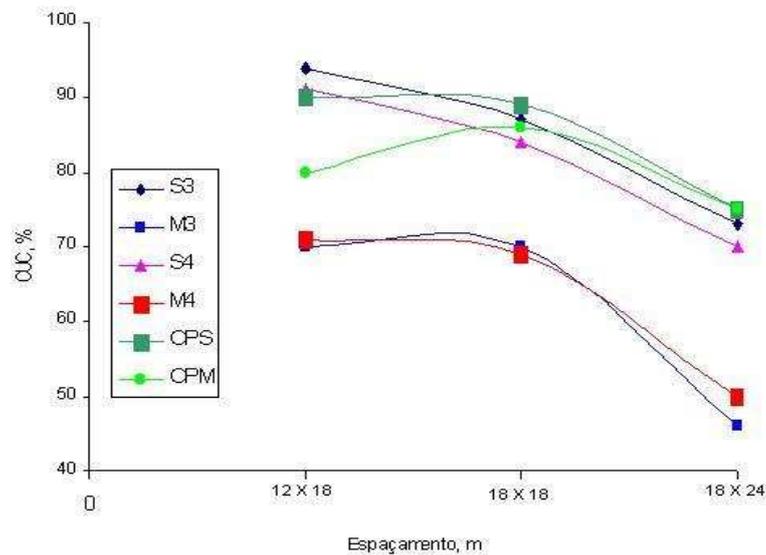


Figura 37 - Coeficientes de uniformidade medidos e simulados para a condição padrão e para velocidades de vento de 3 e 4 m s<sup>-1</sup>, do aspersor modelo FABRIMAR A1823M.

Analisando-se a Figura 37, conclui-se que o modelo superestima os valores de CUC para velocidades de vento de 3 e 4 m s<sup>-1</sup>. Para a condição padrão, os valores de CUC são praticamente iguais. Observa-se ainda, nas Figuras 34 e 35, que as maiores diferenças entre os valores medidos e os simulados, geralmente, estão na extremidade inicial do perfil do aspersor. Isto pode estar associado ao valor de RI, que é a distância de formação da gota em relação ao bocal do aspersor, considerado no modelo, ser diferente do valor real de campo. Um outro aspecto que pode influenciar na exatidão do modelo, é o fato do diâmetro da gota ter sido assumido constante ao longo da trajetória, embora os resultados de várias pesquisas, dentre elas, as de CARVALHO (1991) e PEREIRA (1995), mostrarem que o tamanho da gota praticamente não varia. CARVALHO (1991), trabalhando com o aspersor NAAN-5035, observou que a

evaporação que ocorre na gota d'água de diâmetro médio igual a 1,75 mm, ao longo de sua trajetória, é 0,3 %.

Utilizando-se os dados de precipitação do aspersor Naan-5035, operando a uma pressão de serviço de 350 kPa, simulou-se a influência conjunta da variação da pressão de operação do aspersor (300, 350 e 400 kPa) e da velocidade do vento (0, 1, 2, 3, 4 e 5 m s<sup>-1</sup>) sobre a uniformidade de aplicação de água, para espaçamentos entre aspersores de 18 x 18 m, 18 x 24 m e 24 x 24 m. Os resultados estão apresentados nas Figuras 38 a 40. Observa-se que, na quase totalidade das simulações, o CUC diminuiu com a velocidade do vento e aumentou com as pressões de operação. Observando-se as Figuras 38 a 40, vê-se que um comportamento diferente é encontrado quando a velocidade do vento é de 2 m s<sup>-1</sup>, que apresenta CUC 1% superior ao da velocidade do vento de 1 m s<sup>-1</sup>, na pressão de operação de 300 kPa, nos espaçamentos analisados. Observa-se ainda que, mantendo-se constante a velocidade do vento, e variando-se a pressão de operação de 300 a 400 kPa, a uniformidade, expressa pelo CUC, sempre foi maior para a pressão de 400 kPa.

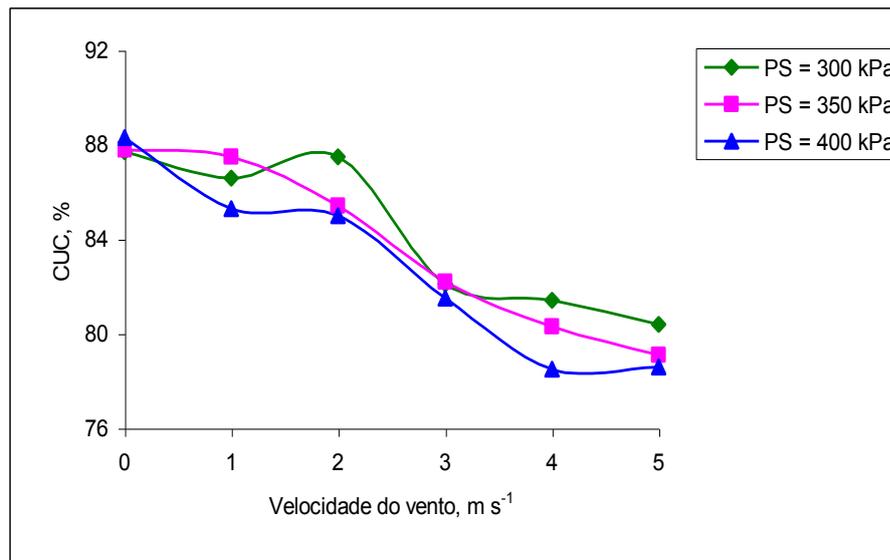


Figura 38 - Influência da pressão de operação e da velocidade do vento sobre a uniformidade de distribuição da água, em espaçamento 18 x 18 m.

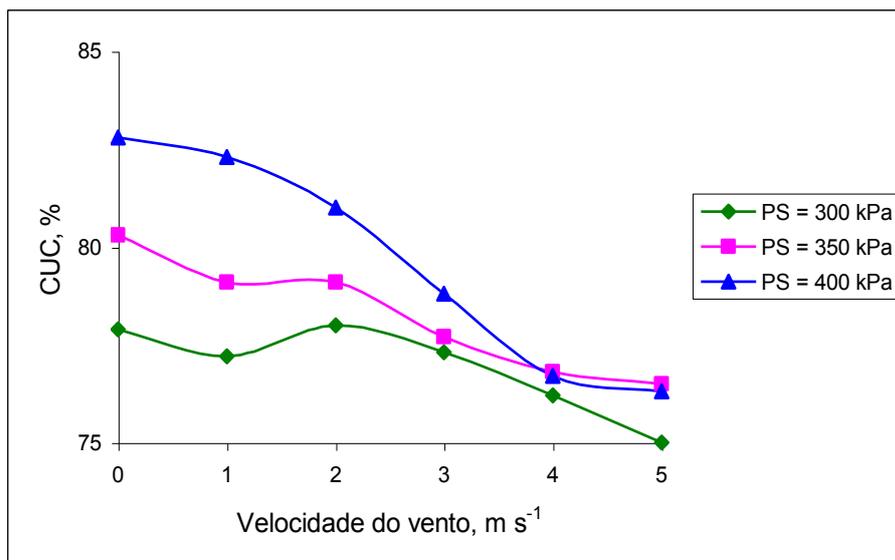


Figura 39 - Influência da pressão de operação e da velocidade do vento sobre a uniformidade de distribuição da água, em espaçamento 18 x 24 m.

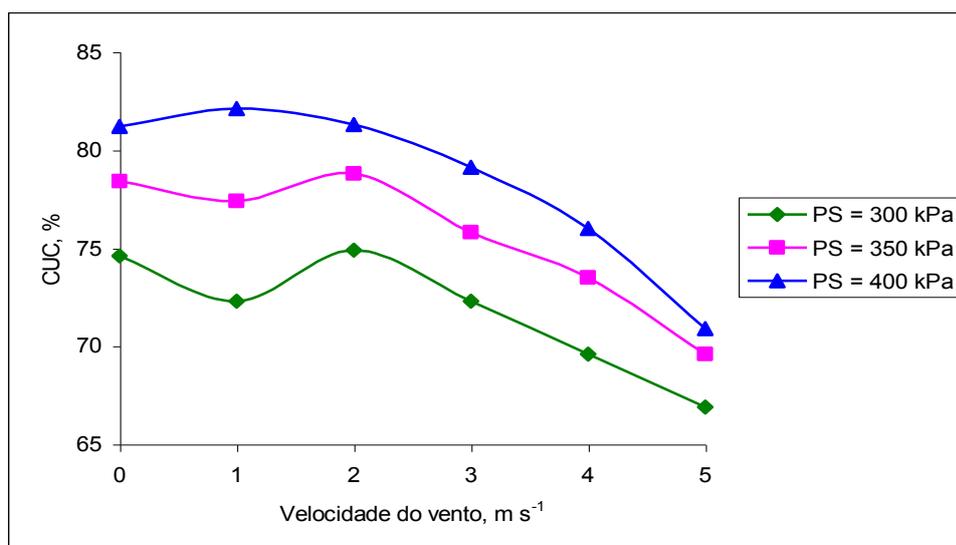


Figura 40 - Influência da pressão de operação e da velocidade do vento sobre a uniformidade de distribuição da água, em espaçamento 24 x 24 m.

#### 4.1.2. Direção do vento

Visando estudar o efeito da direção do vento sobre o coeficiente de uniformidade, simulou-se o CUC para o aspersor NAAN-5035, bocais de 2,5 e 5 mm, ângulo do bocal de 27°, altura da haste de 1,5 m e pressão de operação de

350 kPa, com espaçamentos de 12 x 24, 18 x 24 e 24 x 30 m, para ângulos da direção do vento de 0°, 45° e 90° em relação à linha lateral. Os resultados, para diferentes velocidades de vento, estão apresentados no Quadro 10.

Observa-se que, para um mesmo espaçamento e uma mesma velocidade do vento, de modo geral, os valores de CUC apresentam um ligeiro aumento quando o ângulo da direção do vento varia de 0° (paralelo à linha lateral) para 90° (perpendicular à linha lateral); o que está de acordo com as recomendações de se trabalhar com as linhas laterais perpendiculares à direção do vento (BERNARDO, 1995; KELLER e BLIESNER, 1990; SOARES, 1998).

Para NOGUEIRA e SOUZA (1987) o efeito da direção do vento sobre a uniformidade de irrigação não é nula, porém não é tão significativa.

Quadro 10 - Resultados obtidos de CUC em função da velocidade e direção do vento, utilizando o modelo computacional ASPERSOR

Velocidade do Vento (m s <sup>-1</sup> )	Direção do vento (°)	Espaçamento		
		12 x 24 m	18 x 24 m	24 x 30 m
0	-	86.2	80.3	58.7
1	0	86.1	80.4	58.9
2	0	83.3	78.3	55.4
3	0	80.6	75.9	51.0
4	0	73.7	70.8	42.6
1	45	85.3	79.1	57.5
2	45	85.4	79.1	57.5
3	45	84.2	77.8	54.9
4	45	82.0	76.8	50.0
1	90	86.0	80.0	58.6
2	90	86.4	80.0	58.7
3	90	86.3	80.9	57.3
4	90	84.1	82.55	52.9

## 4.2. Pressão

Visando estudar o efeito da pressão de operação do aspersor sobre o coeficiente de uniformidade, simulou-se o CUC para o aspersor NAAN-5035,

bocais de 2,5 e 5 mm, ângulo do bocal de 27°, altura da haste de 1,5 m, operando com pressões de 3 a 4 atm. Os resultados estão apresentados na Figura 41.

Todo aspersor requer um mínimo de pressão de serviço para proporcionar uma velocidade inicial, que é responsável pela velocidade inicial da gota, garantir um raio de alcance adequado e uma boa pulverização do jato.

Na Figura 41, observa-se que o coeficiente de uniformidade tende a aumentar com a pressão de operação. Os resultados estão em concordância com os dados observados por autores que afirmam que o aumento da pressão de serviço do aspersor, dentro de um intervalo limitado de valores, provoca também um aumento no CUC. A partir de um certo limite, o aumento da pressão de serviço provoca excesso de pulverização, ocasionando diminuição do diâmetro molhado e redução da uniformidade de distribuição (CARVALHO, 1991; VORIES e VON BERNUTH, 1986; TARJUELO et al. 1992; ZOCOLER et al. 1995).

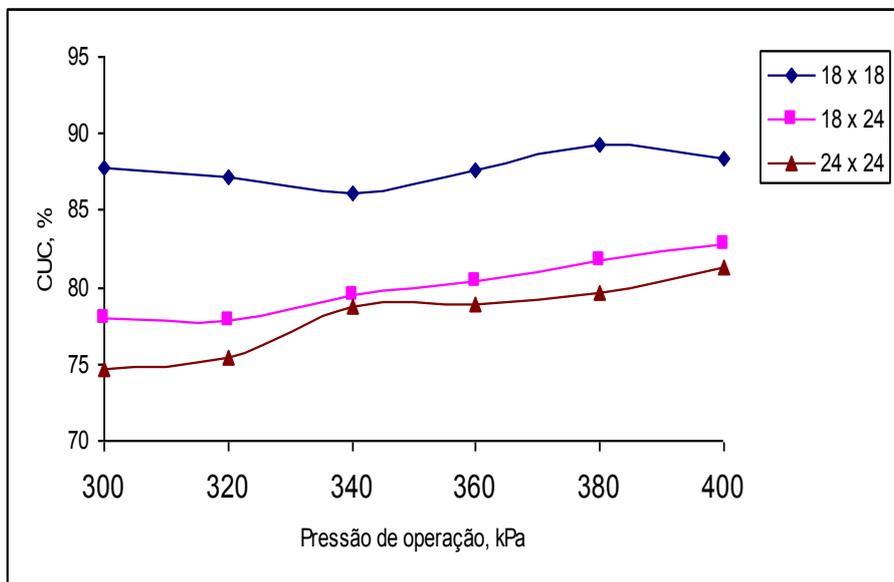


Figura 41 - Simulação do efeito da variação da pressão na uniformidade de distribuição do aspersor Naan-5035 operando na ausência do vento a 350 kPa.

PAZ (1990) e GOMIDE et al. (1980), estudando a influência da pressão na uniformidade de aplicação de água, observaram que o CUC não foi, estatisticamente, influenciado pela pressão, na análise de regressão múltipla realizada.

CARVALHO (1991), trabalhando com aspersores de média pressão, verificou que o CUC aumentou nos espaçamentos estudados de 18 x 24 m e 24 x 24 m, considerando os limites de pressão estudados.

Os resultados obtidos pelo modelo computacional ASPERSOR estão em concordância com os obtidos por AZEVEDO (1998), que, em experimentos de campo, observou pequena variação do CUC com a pressão, da ordem de 2,1%, para CUCs obtidos com pressões de 180 kPa e 460 kPa.

Na Figura 42, observa-se o comportamento da uniformidade frente à variação da pressão de operação e da velocidade do vento. Para o aspersor NAAN-5035, verifica-se que a uniformidade comportou-se diferentemente da tendência apresentada pelo CUC na Figura 41, pois quando a velocidade do vento mudou de 2 para 5 m s<sup>-1</sup>, o CUC foi maior para a menor pressão. Este resultado está de acordo com ARRUDA (1981), que recomenda reduzir a pressão de operação do aspersor à medida que a velocidade de vento aumenta.

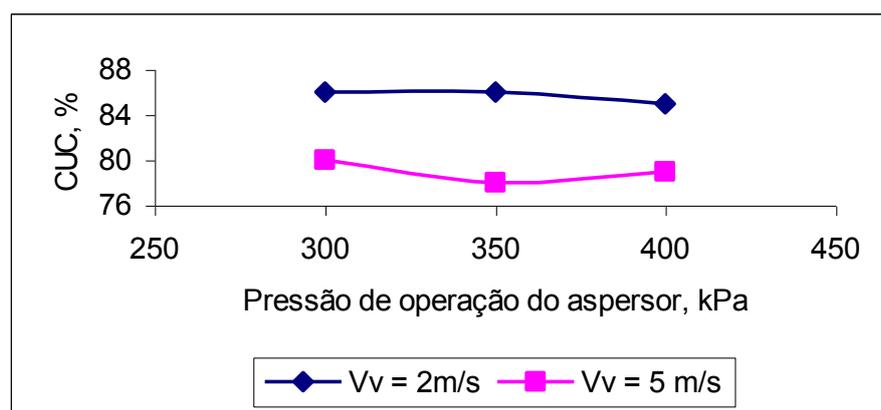


Figura 42 - Simulação da uniformidade frente à variação da pressão de operação e da velocidade do vento, para o aspersor NAAN-5035.

Na Figura 43, apresenta-se a simulação do efeito da pressão sobre o diâmetro molhado pelo aspersor. Observa-se que, dentro da faixa recomendada de pressão para o aspersor NAAN-5035, o diâmetro molhado aumentou com a pressão.

Os resultados apresentados pelo modelo computacional, no que diz respeito ao efeito da pressão sobre o diâmetro molhado pelo aspersor, estão em concordância com SHULL e DYLLA (1976), que verificaram que o aumento da pressão provocou um ligeiro acréscimo no raio de alcance do aspersor.

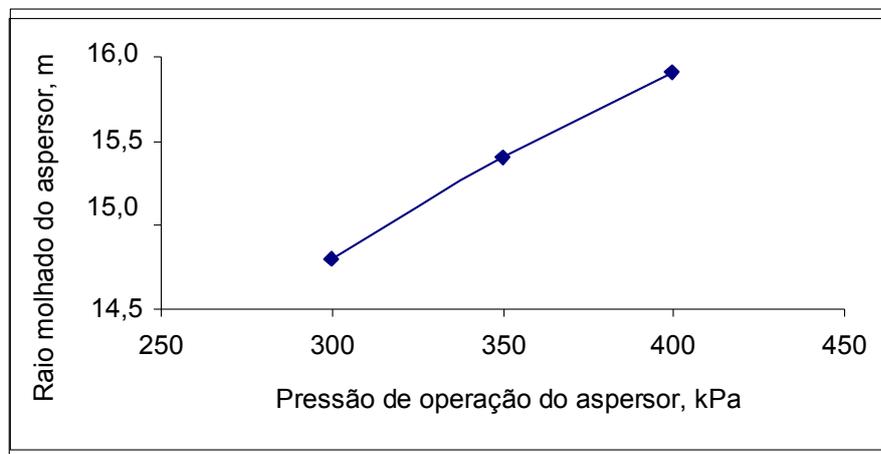


Figura 43 - Variação do raio molhado do aspersor NAAN-5035 com a variação da pressão de operação.

#### 4.3. Efeito do ângulo de trajetória

Utilizando-se os dados de precipitação do aspersor NAAN-5035 com ângulo de inclinação de  $27^\circ$  e diâmetros de bocais de 2,5 e 5 mm, altura da haste de 1,5 m, pressão de serviço de 350 kPa, operando sob condições de vento nulo, simulou-se o coeficiente de uniformidade, CUC, para diferentes ângulos de inclinação do bocal do aspersor, nos espaçamentos de 18 x 18 m e 18 x 24 m. Os resultados são apresentados no Quadro 11.

Observa-se que, para velocidade de vento de  $4 \text{ m s}^{-1}$ , os aspersores com menores ângulos de inclinação do bocal,  $21^\circ$  e  $23^\circ$ , forneceram melhores CUCs

do que os aspersores com ângulos de inclinação do bocal de 27° e 30°. Os dados simulados pelo modelo computacional estão em concordância com os observados por SOARES (1998).

Quadro 11 - Valores de CUC para diferentes ângulos de bocais de aspersores operando a 350 kPa, em espaçamentos 18 x 18 m e 18 x 24 m, com velocidade de vento igual a 4 m s<sup>-1</sup>

Espaçamento	Ângulo do bocal			
	21°	23°	27°	30°
18 x 18 m	82,85	82,16	81,35	80,88
18 x 24 m	74,05	73,74	70,76	69,44

#### 4.4. Declividade

PEREIRA (1995), analisando as interações do perfil de distribuição de água do aspersor com a inclinação da superfície do solo, verificou que, para qualquer ângulo do tubo de elevação do aspersor com a vertical estudado, o coeficiente de uniformidade decresceu quando aumentou a inclinação do terreno. Esta tendência também é observada no modelo computacional desenvolvido, conforme Figura 44.

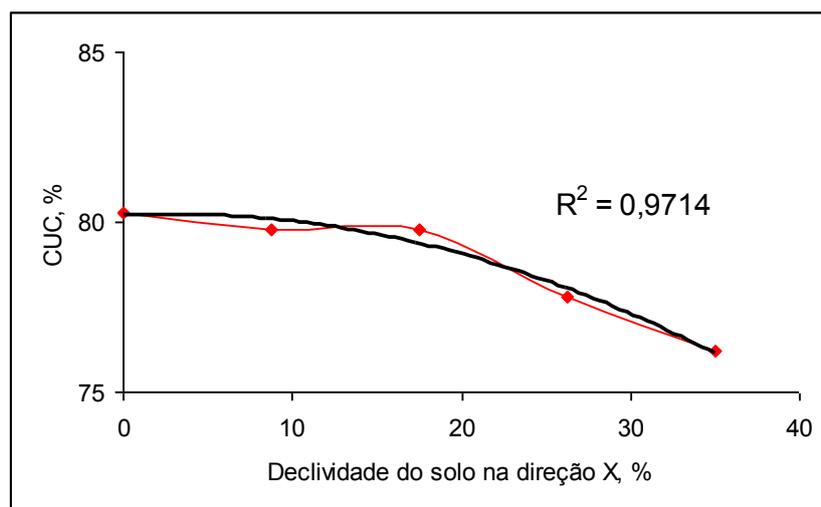


Figura 44 – Simulação da variação da uniformidade de distribuição em uma área com declividade na direção de X, utilizando o aspersor NAAN-5035.

#### 4.5. Simulação da produtividade real da cultura

Utilizando-se os dados de  $k_c$ ,  $k_y$ , duração dos períodos de crescimento da cultura e graus dias, relativos à cultura da soja, obtidos por PEREIRA (1998), na localidade de Viçosa, MG, simulou-se a produtividade da cultura para dados reais, com data de plantio em 19/12/93 e duração do ciclo de 125 dias. A produtividade média encontrada nos tratamentos realizados, na safra 1997/98, foi de  $3,7 \text{ t ha}^{-1}$ .

Os valores de  $k_c$  e  $k_y$  utilizados na simulação foram (0,4; 0,2), (0,8; 0,5), (1,1; 0,8), (0,85; 1) e (0,55; 0,8), respectivamente, para os estádios fenológicos I, II, III, IV e V.

Para o período simulado, e considerando  $p > 0$ ,  $\text{CUC} = 80 \%$  e  $100 \%$  da IRN, a produtividade real da cultura da soja foi de  $4.581 \text{ kg ha}^{-1}$ . Considerando-se  $p = 0$ ,  $\text{CUC} = 80 \%$  e  $100 \%$  da IRN, a produtividade real da cultura da soja foi de  $4.574 \text{ kg ha}^{-1}$ .

No Quadro 12 são apresentados alguns valores de produtividade real da cultura da soja, no período simulado, com  $p = 0$  e CUC variando de 60 a 90 %.

Quadro 12 - Valores simulados da produtividade real da cultura da soja para diferentes valores de CUC e  $p = 0$ , no período considerado

CUC (%)	60	65	70	75	80	85	90
$Y_R$ (kg ha <sup>-1</sup> )	4.270	4.351	4.429	4.505	4.574	4.632	4.661

Na Figura 45 apresenta-se a produtividade simulada da cultura da soja, considerando  $p > 0$ , em função da variação do CUC, para data de plantio de 19/12/1993, utilizando-se dados climáticos reais. Observa-se que não houve variação na produtividade da cultura, em função da uniformidade. Isto se deve ao fato de a precipitação, no período, ter sido elevada, em torno de 709 mm de precipitação efetiva no ciclo, de acordo com relatório do balanço hídrico gerado pelo programa computacional, enquanto que a lâmina de irrigação aplicada variou de 60 a 90 mm. Nesta condição, onde a qualidade da irrigação em termos de CUC não influenciou a produtividade, recomenda-se não irrigar a cultura.

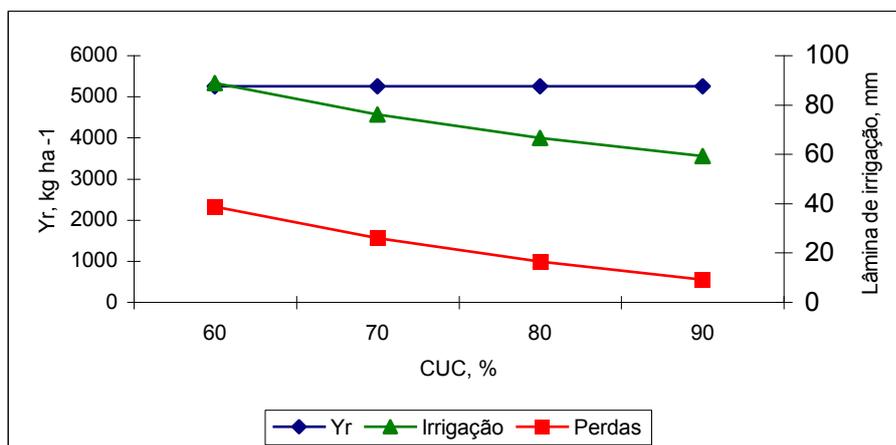


Figura 45 - Comportamento da produtividade real da cultura, em função da variação do CUC, considerando  $p > 0$ .

Na Figura 46 tem-se a produtividade simulada da soja em função do CUC quando não foi considerada a precipitação, isto é,  $p = 0$ . Observa-se que a

produtividade aumentou com o CUC variando de 5.512 kg ha<sup>-1</sup> para 5.653 kg ha<sup>-1</sup> quando o CUC variou de 60 para 90%. A lâmina bruta de irrigação variou de 130 mm para CUC de 90% a 195,5 mm para CUC de 60%, enquanto as perdas de água nas irrigações variaram de 18 a 84 mm para CUCs de 90 e 60 %, respectivamente.

Analisando-se estes dados, conclui-se que a cultura da soja não respondeu satisfatoriamente à qualidade da irrigação para a região estudada, pois o incremento na produtividade foi de apenas 141 kg ha<sup>-1</sup>, correspondendo a um acréscimo de 2,56%.

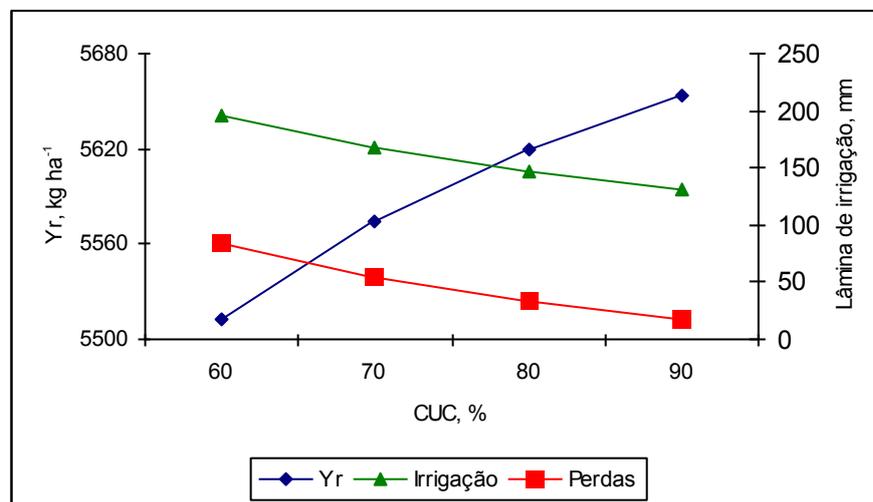


Figura 46 - Comportamento da produtividade real da cultura da soja, da lâmina de irrigação e das perdas de água em função do CUC, considerando  $p = 0$ .

Na Figura 47 apresenta-se a produtividade simulada da cultura do milho considerando  $p > 0$ , em função da variação do CUC, para plantio em 05/03/1961, em Montes Claros, MG, utilizando-se dados climáticos reais.

Utilizou-se, na simulação da produtividade da cultura de milho, os dados tabelados da FAO (DOORENBOS e KASSAM, 1979).

Os valores de  $k_c$  e  $k_y$  utilizados na simulação foram (0,4; 0,4), (0,8; 0,4), (1,1; 1,5), (0,85; 0,5) e (0,55; 0,2), respectivamente, para os estádios fenológicos

I, II, III, IV e V. A duração dos estádios fenológicos I, II, III, IV e V, em dias, foi de 15, 30, 30, 30, e 5, respectivamente.

A produtividade simulada foi de 6.611 e 7320 kg ha<sup>-1</sup>, para o CUC de 60 e 90%, respectivamente. Observou-se um aumento na produtividade da cultura de 709 kg ha<sup>-1</sup>, quando o CUC passou de 60 para 90%, correspondendo a um acréscimo de 10,7%.

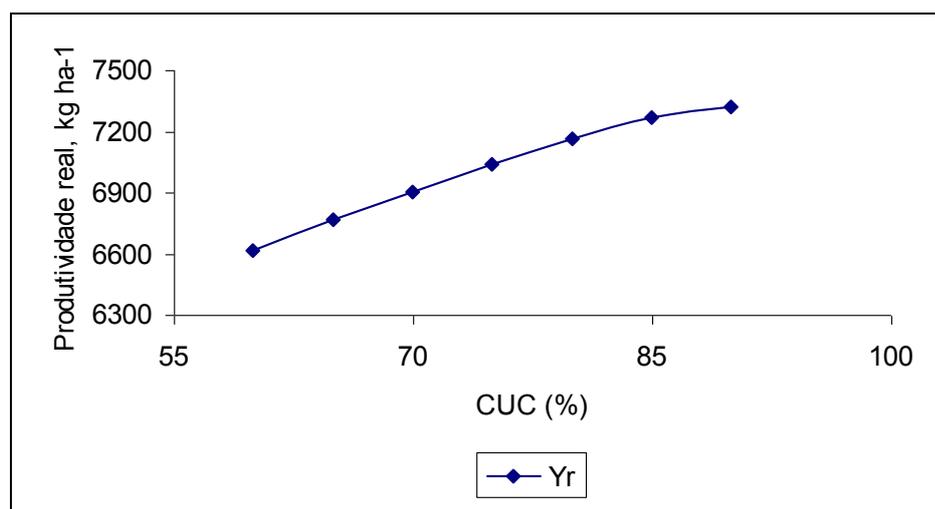


Figura 47 - Produtividade simulada para a cultura do milho em função do CUC, em Montes Claros, MG, considerando  $p > 0$ .

#### 4.6. Custo do sistema, uniformidade e produtividade da cultura

O sistema de irrigação foi dimensionado para irrigar a cultura da soja, com espaçamentos entre os aspersores de 18 x 18 m, 18 x 24 m e 24 x 24 m, apresentando uniformidades de 89 , 77 e 72 %, e custos relativos do sistema de R\$ 1124,00 por hectare, R\$ 1034,00 por hectare, e R\$ 1033,00 por hectare, respectivamente.

A diferença entre os custos dos sistemas de irrigação, dimensionados com espaçamentos entre aspersores de 18 x 18 e 24 x 24 m foi de R\$ 91,00 por hectare, correspondendo a um acréscimo de 8,8% nos custos, quando se aumentou a uniformidade de 70 para 90%.

As produtividades da cultura foram de 4.429 kg ha<sup>-1</sup>, para uniformidade de 70% e 4.661 kg ha<sup>-1</sup>, para uniformidade de 90%, a qual correspondeu à

produtividade potencial da cultura. A produtividade da cultura, associada ao custo do dimensionamento do sistema, é apresentada na Figura 48.

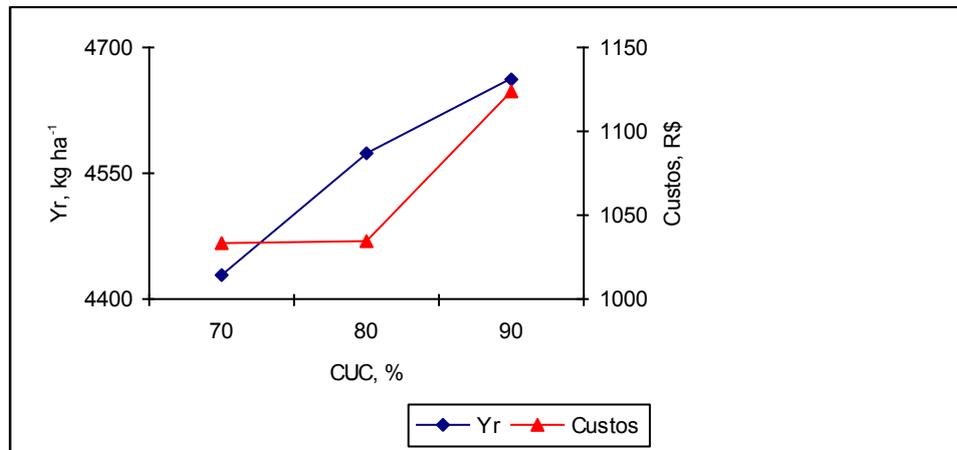


Figura 48 - Produtividade da soja e custo do sistema de irrigação em função da uniformidade.

A variação na produtividade da cultura, comparando-se a uniformidade de 70 % e 90 %, foi de 232 kg ha<sup>-1</sup>, o que correspondeu a 5,2% de acréscimo na produtividade, quando se utilizou uma uniformidade maior, ou seja, 90 %.

Considerando o preço médio da soja no mercado, R\$ 19,00 por saca de 60 kg, à vista (CEPEA, 2000), a leitura que se faz destes dados é que o produtor necessitaria de um aumento na produtividade da cultura superior a 293,5 kg ha<sup>-1</sup>, ou que o preço do quilograma de soja fosse maior que R\$ 0,39, para obter lucro financeiro no investimento.

Baseado no preço atual da soja e na variação marginal da produtividade da cultura da soja às variações da uniformidade do sistema de irrigação, não se aconselha ao produtor investir na melhoria da uniformidade do sistema de irrigação. Na prática, o produtor já não investe na irrigação de soja.

Merece análise a situação em que o preço da água é muito elevado, quando comparado ao preço da cultura. Neste caso, com uma maior uniformidade, as perdas de água serão menores, como observado na Figura 45. No entanto, quando o preço da água é baixo e o manejo é inadequado, pode-se levar a uma aplicação excessiva de água, promovendo-se uma lixiviação de

nutrientes e, provavelmente, uma contaminação do lençol freático, causando danos ao meio ambiente.

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

Um modelo computacional, denominado ASPERSOR, foi desenvolvido para simulação e dimensionamento de irrigação por aspersão convencional, sob diferentes condições operacionais, levando-se em conta a uniformidade de aplicação de água e o rendimento da cultura.

O aplicativo ASPERSOR possui um banco de dados de aspersores, tubulações e peças especiais de diferentes materiais e fabricantes, motores elétricos e diesel, bombas centrífugas, o qual possibilita atualização periódica pelo usuário. Possui também um banco de dados climáticos das estações de alguns municípios mineiros. O aplicativo possibilita o acesso ao programa MAXBOMBAS (DEA/UFV).

No módulo simulação da uniformidade de distribuição o usuário fornece ao programa as precipitações de um aspersor operando em um plano em nível e ausência de ventos, bem como os dados relativos a operação do aspersor, e o modelo simula a uniformidade, para diferentes espaçamentos entre aspersores, com base no CUC e no CUD, fornecendo as novas precipitações, a distribuição das gotas na superfície do solo e o perfil de distribuição do aspersor, para diversas condições de declividade da superfície do solo, velocidade e direção do vento, pressão de operação do aspersor, entre outras.

No módulo simulação da produtividade das culturas, o usuário fornece ao programa os dados da cultura, do solo, do clima e data de plantio, e o modelo calcula a evapotranspiração, o turno de rega, a demanda de irrigação total ou suplementar, fornecendo gráficos e relatórios personalizados.

No módulo dimensionamento da irrigação por aspersão convencional o modelo utiliza as informações já conhecidas no módulo da produtividade das culturas juntamente as informações fornecidas pelo usuário das características da área a ser irrigada, para condições de irrigação suplementar, considerando uma precipitação provável em nível de 75 % de probabilidade. As linhas laterais são dimensionadas com no máximo dois diâmetros, atendendo aos critérios de uniformidade de pressão e vazão ao longo da tubulação. A linha principal é dimensionada utilizando o método econômico observando os limites de velocidade da água na tubulação de 1 a 2 m s<sup>-1</sup>.

Após executados os cálculos, o programa apresenta um relatório de projeto constando de: modelo, número e preço dos aspersores; número, diâmetro e preço dos tubos das linhas lateral, principal e de sucção; nome, quantidade e preços das peças especiais do sistema; marca, modelo, potência e preço da bomba e do motor; custo da mão-de-obra; custo total do projeto e custo do projeto por hectare.

Na validação, o modelo computacional simulou bem o efeito do vento sobre a uniformidade de distribuição de água.

O modelo foi utilizado para simular o efeito do vento, da declividade do solo, da pressão de operação, do ângulo de inclinação do aspersor, da altura da haste para os aspersores NAAN 5035 e FABRIMAR A1823M e os resultados permitiram as seguintes conclusões:

- 1) o vento provocou concentração de água próximo ao aspersor, principalmente, na direção do vento;
- 2) o raio molhado aumentou no sentido do vento e diminuiu no sentido contrário;
- 3) Para velocidade do vento maiores que 2 m s<sup>-1</sup> e espaçamentos de 12 x 24 m, 18 x 24 m e 24 x 30 m, os maiores valores de CUC foram alcançados com o vento soprando perpendicularmente à linha lateral.
- 4) De modo geral, para velocidade de vento alta, ângulos de inclinação do bocal de 22° a 25° proporcionaram valores mais elevados de CUC.
- 5) A variação do CUC com a pressão de operação do aspersor foi pequena, dentro da faixa de operação de 304 a 405 kPa.
- 6) A uniformidade de distribuição de água diminuiu com o aumento da declividade do terreno.
- 7) A uniformidade de distribuição de água depende principalmente das interações entre espaçamento entre aspersores, declividade da superfície do solo e velocidade e direção do vento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, A.D., CASTRO, P.T. Desempenho de um sistema de irrigação por aspersão tipo canhão hidráulico sob diferentes condições de velocidade de vento na região de Paracuru, CE. **Engenharia Rural**, v. 6, n. 2, p. 79-84, 1995.
- ANDRADE, C.L.T. **Pressure and discharge distribution simulation in pressurized irrigation systems**. Logan: Utah State University, 1997, 276 p. Tese (Ph. D.) - Utah State University, 1997.
- ARRUDA, N.T. **Análise de uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão em linha**. Viçosa, MG: UFV, 1981. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1981.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE. **Procedure for sprinkler distribution testing for ressearch purposes**. St. Joseph: 1984. p. 457-459. ( ASAE Standards, ASAE S330).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Aspersores para irrigação: avaliação da distribuição de água - método de ensaio**. 1985. 9 p. (ASAE, NBR 8989).
- AZEVEDO, H.J. de. **Influência de elementos do clima no desempenho de sistemas de irrigação por aspersão na região Norte Fluminense**. Viçosa, MG: UFV, 1998. 143 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- BENAMI, A., HORE, F.H. A new irrigation sprinkler distribution coefficient. **Transactions of the ASAE**, v.7, n. 2, p. 157-158, 1964.

- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 6. ed. Viçosa, MG: UFV, 1995. 596 p.
- BERNARDO, S. Irrigação e produtividade. **Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 3, p. 186-196, 1998.
- BILANSKI, W.K., KIDDER, E.H. Factors that affect the distribution of water from a medium pressure rotary irrigation sprinkler. **Transactions of the ASAE**, v. 1, n. 1, p. 19-28, 1958.
- CALHEIROS, C.B.M., QUEIROZ, J.E., FRIZONE, J.A., PESSOA, P.C.S. Estratégias ótimas de irrigação do feijoeiro: água como fator limitante da produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 31, n. 7, p. 509-515, 1996.
- CARVALHO, J.A. **Tamanhos de gotas e uniformidade de distribuição de água de dois aspersores de média pressão**. Viçosa, MG: UFV, 1991. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- CEPEA. **Indicador de preços ESALQ/BM&F**. Capturado pela Internet em 25/02/2000. <http://www.ciagri.usp.br/~cepea/DADOSOJA.HTM>
- CHARMELO, L.C.L. **Desempenho de um sistema de irrigação autopropelido, sob diferentes condições operacionais**. Viçosa, MG: UFV, 1990. 50 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1990.
- CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: University of California, College of Agriculture. Agricultural Experiment Station, 1942. 124 p. (Bulletin 670).
- CLARK, R.N., FINLEY, W.W. **Sprinkler evaporation in the southern plains**. Chicago, Illinois: American Society of Agricultural Engineers, 1975. 12 p. (Paper n. 75-2573).
- COELHO, R.D. **Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1990. 141 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1990.
- COELHO, R.D., FOLEGATTI, M.V. Influência do nível de tensão da mola na percentagem de água desviada e de energia absorvida em um aspersor de impacto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**.v.2, n.2, p. 170-174, 1998.

- COOPER, P.J.M., HARRIS, H.C., GOEBEL, W. Climatic variability and food production in West Asia and North Africa. In: International symposium on climate variability and food security in developing countries, New Delhi: 1987. **Climate and food security**, s.1, 1987. p. 69-83.
- COSTA, S.C., CASTRO, P.T. Desempenho de um sistema de irrigação autopropelido sob diferentes condições de velocidade de vento. **Engenharia Rural**, v. 4, p. 102-116, 1993.
- CRIDDLE, W.D., DAVIS, S., PAIR, C.H., SHOCKLEY, D.G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24 p. (Agricultural Handbook, 82).
- DAVIS, J.R. Measuring water distribution from sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v. 9, n. 1, p. 94-97, 1966.
- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Tradução do livro: Yield Response to Water. FAO, Irrigation and Drainage Paper 33, Rome, FAO, 1979).
- DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 156 p. (Irrigation Drainage Paper 24).
- EDLING, R.J. Kinetic energy, evaporation and wind drift of droplets from low pressure irrigation nozzles. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 5, p. 1543-1550, 1985.
- FISCHER, G.R., WALLENDER, W.W. Collector size and test duration effects on sprinkler water distribution measurement. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 2, p. 538-542, 1988.
- FRIZZONE, J.A. **Irrigação por aspersão: uniformidade e eficiência**. Piracicaba, SP: USP, ESALQ, 1992. 53 p. (Série Didática, 3).
- FRIZZONE, J.A. **Função de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba, SP: USP, ESALQ, 1993. 53 p. (Série Didática, 006).
- FUKUI, Y., NAKANISH, K., OKAMURA, S. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. **Irrigation Science**, v. 2, p. 23-32, 1980.
- GARCIA, D.J.L. Riego por aspersión. In: **Curso Internacional de Ingenieria de Regadio**, 2, Brasília, 168 p. 1986.

- GOMES, H.P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento**. 2. ed. Campina Grande, PB: UFPB, 1997. 390 p.
- GOMIDE, R.L. **Determinação e análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão**. Viçosa, MG: UFV, 1978. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1978.
- GOMIDE, R.L., BERNARDO, S., VIEIRA, M., SEDIYAMA, G.C. Modelo matemático para determinar a uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. **Revista Ceres**, v. 27, n. 153, p. 471-485, 1980.
- GREEN, R.L. Evaluation of air resistance to freely falling drops of water. **Agricultural Engineering**, v. 33, n.1, p.28, 1952.
- HAN, S., EVANS, R.G., KROEGER, M.W. Sprinkler distribution patterns in windy conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 37, n. 5, p. 1481-1489, 1994.
- HARGREAVES, G.H. Moisture availability and crop production. **Transactions of the ASAE**, v. 18, n. 5, p. 980-984, 1975.
- HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. **Agricultural Engineers**, v. 42, n. 7, p. 354-355, 1961.
- HART, W.E. Subsurface distribution of nonuniformity applied surface waters. **Transactions of the ASAE**, v. 15, n. 4, p. 656-661, 1972.
- HART, W.E., NORUM, D.I., PERI, G. Optimal seasonal irrigation application analysis. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v.106, n. 3, p. 221-235, 1980.
- HEERMAN, D., KOHL, R.A. Fluid dynamics of sprinkler systems. In: JANSEN, M.E. **Design and operation of farm irrigation systems**, ASAE, 1980. p. 583-618.
- HERRERA, J.B. **Necessidade de água e programacion de riegos**. PRONI, II Curso internacional de ingenieria de regadios, 1987. 153 p.
- HILLS, D.J., GU, Y. Sprinkler volume mean droplet diameter as a function of pressure. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 2, p. 471-476, 1989.

- KARMELI, D. Estimating sprinkler distribution patterns using linear regression. **Transactions of the ASAE**, v. 21, n. 4, p. 682-686, 1978.
- KELLER, J., BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Avibook, 1990. 649 p.
- KOHL, R.A. Drop size distribution from medium-sized agricultural sprinklers. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, p. 690-693, 1974.
- LANZER, E.A., PARIS, Q. A especificação de modelos para análise econômica de uso de fertilizantes: um caso encerrado?! **Revista de Economia Rural**, v. 18, n. 18, p. 23-36, 1980.
- LAWS, J.O. Measurement of fall velocity of water drops and raindrops. **Transactions of the American Geophysics**, Washington DC: v. 22, p. 709-721, 1941.
- LI, J., KAWANO, H. Simulating water-drop movement from noncircular sprinkler nozzles. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, n. 2, p. 152-158, 1995.
- LI, J., KAWANO, H. Sprinkler rotation nonuniformity and water distribution. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 6, p. 2027-2031, 1996.
- LIST, R.J. Smithsonian meteorological tables. Washington DC: Smithsonian Institute, v. 11, 1966. 527 p. (Smithsonian Misc. Collections, 114).
- LOSADA, A., JUANA, L., ROLDÁN, J. Operation diagrams for irrigation management. **Agricultural Water Management**, v. 18, p. 289-300, 1990.
- MANTOVANI, E.C. **Desarrollo y evaluación de modelos para el manejo del riego: estimación de la evapotranspiración y efectos de la uniformidad de aplicación del riego sobre la producción de los cultivos**. Córdoba: ETSIA, 1993. 184 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agronomos, 1993.
- MANTOVANI, E.C., VILLALOBOS, F.J., ORGAZ, F., FERERES, E. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 243-257, 1995.
- MANTOVANI, E.C., SOARES, A.A. **Manejo de irrigação**. In: COSTA, L.C., MANTOVANI, E.C., SOARES, A.A. Sistema de suporte à decisão agrícola: Manejo da cultura e dos recursos hídricos. Workshop internacional sobre manejo integrado das culturas e dos recursos hídricos. Brasília/DF, 02 a 04 de

junho, 1998, 153p.

MERRIAM, J.L., SHEARER, M.V., BURT, C.M. Evaluating irrigation systems and practices. In: JENSEN, M. E. **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph, MI: ASAE, 1983. p.583-618.

MERRINGTON, A.C., RICHARDSON, E.G. The breakup of liquid jets. Proceedings of the Physical Society, London: v. 59, n. 2, p. 1-13, 1947.

MOTA, F.S., OLIVEIRA, M.O. Indicação para a elaboração de um programa de computador para o cálculo do balanço hídrico diário versátil para uso no Brasil ( adaptado de Baier et al., 1972). **Boletim Técnico do Instituto Nacional de Meteorologia**, n. 16, p. 23-36, 1978.

MOYNAHAN, M.D. **The use of sprinkler profiles to predict field performance**. Logan, Utah: Utah State University, 1972. 79 p. Dissertação (M.Sc) - Utah State University, 1972.

NOGUEIRA, L.C., SOUZA, F. Avaliação de dois sistemas de irrigação por aspersão. II - Análise da uniformidade de distribuição. **CONBEA**, v.1, p. 139-149, 1987.

OLITTA, A.F.L. **Os Métodos de irrigação**. São Paulo: USP, ESALQ, 1986. 267 p.

OLIVEIRA, S.L. de. **Funções de resposta do milho doce ao uso de irrigação e nitrogênio**. Viçosa, MG: UFV, 1993, 91 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1993.

PAIR, C.H. Water distribution under sprinkler irrigation. **Transactions of the ASAE**, v. 11, n. 5, p. 648-651, 1968.

PAIR, C.H., HINZE, W.W., REID, C., FROST, K.R. **Sprinkler irrigation**. Washington DC: Sprinkler Association, 1969. 444 p.

PAIVA, J.B.D. **Uniformidade de aplicação de água abaixo da superfície do solo utilizando irrigação por aspersão**. São Carlos, SP: UFSC, 1980. 330 p. Dissertação ( Mestrado em ) - Universidade Federal de São Carlos, 1980.

PAZ, V.P.S. **Perdas de água e uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão**. Viçosa, MG: UFV, 1990. 59 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1990.

PAZ, V.P.S. **Condições ótimas de operação de sistemas de irrigação por**

- aspersão.** Piracicaba, SP: ESALQ, 1995. 125 p. Tese (Doutorado em Agronomia, Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1995.
- PEREIRA, A.R., VILLA NOVA, N.A., SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração.** Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.
- PEREIRA, C.R. **Crescimento e desenvolvimento da cultura da soja [Glycine max (L.) Merrill] sob deficiência hídrica.** Viçosa, MG: UFV, 1998. 97 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- PEREIRA, G.M. **Simulação das perdas de água por evaporação e da uniformidade de distribuição na irrigação por aspersão.** Viçosa, MG: UFV, 1995. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1995.
- PEREIRA, G.M., SOARES, A.A., ALVES, A.R., RAMOS, M.M., MARTINEZ, M.A. Modelo computacional para simulação das perdas de água por evaporação na irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, v. 16, n. 3, p. 11-26, 1997.
- REZENDE, R. Desempenho de um sistema de irrigação pivô central quanto à uniformidade e eficiência de aplicação de água abaixo e acima da superfície do solo. Piracicaba, SP: ESALQ, 1992. 86 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1992.
- ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L., VERMA, S.B. **Microclimate the biological environment.** New York: John Willey & Sons, 1983. 495 p.
- SAMPAIO, S.C. Tamanho de gotas de um aspersor em função da ação do braço defletor, da pressão e do raio de alcance. **Engenharia Rural**, v. 8, n. 2, p. 52-59, 1997.
- SCALOPPI, E.J. Características dos principais sistemas de irrigação. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, v. 25, p. 22-27, 1986.
- SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas.** Brasília, DF: ABEAS, UFV, DEA, 1996. 173 p. (Curso por tutoria à distância. Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação. Módulo, 2).
- SEGINER, I. Tangencial velocity of sprinkler drops. **Transactions of the ASAE**, v. 8, n. 1, p. 90-93, 1965.

- SEGINER, I. Wind variation and sprinkler water distribution. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 95, n. IR2, p. 261-274, 1969.
- SEGINER, I., NIR, D., VON BERNUTH, R.D. Simulation of wind-distorted sprinkler patterns. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n. 2, p. 285-306, 1991.
- SHULL, H., DYLLA, A.S. Traveling boom sprinkler operation in wind. **Transactions of the ASAE**, v. 19, n. 3, p. 501-504, 1976.
- SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45 p.
- SOARES, A.A. **A Computer model to study the influence of the sprinkler riser angle, nozzle angle and soil surface slope on the uniformity of distribution**. Logan: Utah State University, 1986. 126 p. Tese (Ph.D.) - Utah State University, 1986.
- SOARES, A.A., WILLARDSON, L.S., KELER, J. Surface-slope effects on sprinkler uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 117, n. 6, p. 870-880, 1991.
- SOARES, A.A. **Irrigação por aspersão e localizada**. Brasília, DF: ABEAS, UFV, DEA, 1998. 86 p. (Curso por tutoria à distância. Curso de Engenharia e Manejo de Irrigação. Módulo, 4).
- SOLOMON, K. Variability of sprinkler coefficient of uniformity test results. **Transactions of the ASAE**, v. 22, n. 5, p. 1078-1086, 1979.
- SOLOMON, K.H., KINCAID, D.C., BEZDEK, J.C. Drop size distribution for irrigation spray nozzles. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 6, p. 1966-1974, 1985.
- SOUZA, E.F. **Modelo computacional aplicado ao manejo e planejamento de irrigação**. Viçosa, MG: UFV, 1993. 65 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1993.
- STANHILL, B. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux. **Journal of Applied Meteorology**, v. 8, p. 509-513, 1969.
- STOCKLE, C.O., DUGAS, W.A. Effect of water variability and precipitation uncertainty on grain sorghum irrigation scheduling. **Transactions of the ASAE**, v. 32, n. 6, p. 1934-1943, 1989.

- TARJUELO, J.M. **El riego por aspersión y su tecnología.** Madrid: Mundi-Prensa, 1995. 491 p.
- TARJUELO, J.M., GOMEZ, M.V., PARDO, J.L. Working of sprinkler to optimize application of water. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 118, n. 6, p. 895-913, 1992.
- TARJUELO, J.M., MARTINEZ, J.M. Evaluación del riego por aspersión en remolacha. In: **Plan 97 para la tecnificación del cultivo de la remolacha.** p. 1-19, 1993.
- TARJUELO, J.M., CARRIÓN, P., VALIENTE, M. Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento. **Revista de Investigación Agraria: Producción e Protección Vegetal**, v. 9, n. 2, 14p. 1994.
- TARJUELO, J.M., MONTERO, J., CARRIÓN, P.A., HONRUBIA, F.T., CALVO, M.A. Irrigation uniformity with medium size sprinklers. Part II: Influence of wind and other factors on water distribution. **Transactions of the ASAE**, v. 42, n. 3, p. 677-689, 1999.
- THOMPSON, R.L. **Economia da produção I.** Viçosa, MG: UFV, 1973. 222 p. (Mimeografiado).
- THOM, H.C.S. **Some methods of climatological analysis.** Geneve: WMO, 1966. 53 p. (Technical note, 81).
- VON BERNUTH, R.D. Uniformity design criteria under limited water. **Transactions of the ASAE**, v. 26, n. 5, p. 1418-1421, 1983.
- VON BERNUTH, R.D. Effect of trajectory angle on performance of sprinklers in wind. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 114, n. 4, p. 579- 587, 1988.
- VON BERNUTH, R.D., GILLEY, J.R. Sprinkler droplet size distribution estimation from single leg test data. **Transactions of the ASAE**, v. 27, n. 5, p. 1435-1441, 1984.
- VON BERNUTH, R.D., SEGNER, I. Wind considerations in sprinkler system design; visions of the future. In: **Third National Irrigation Symposium**, St. Joseph, Michigan: ASAE, 1990.

VORIES, E.D., VON BERNUTH, R.D. **Simulation of wind effects on sprinkler uniformity**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers, 1985. 40 p. (Paper n. 85-2063).

VORIES, E.D., VON BERNUTH, R.D. Single nozzle sprinkler performance in wind. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 5, p. 1325-1330, 1986.

VORIES, E.D., VON BERNUTH, R.D., MICKELSON, R.H. Simulating sprinkler performance in wind. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 113, n. 1, p. 119-130, 1987.

WILCOX, J.C., SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947.

WMO. 1997.

ZOCOLER, J.L., FRIZZONE, J.A., PEREIRA, G.T, PEREIRA, A.S. Uniformidade de distribuição de água versus custos do sistema de aspersão convencional. **Engenharia Rural**, v. 6, n. 2, p. 39-48, 1995.

ZOCOLER, J.L., FRIZZONE, J.A., PEREIRA, A.S., HERNADEZ, F.B.T. Estimativa de custos em sistemas semifixos de irrigação por aspersão convencional. **Engenharia Rural**, v. 8, n. 2, p. 60-72, 1997.