



REINALDO LÚCIO GOMIDE

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO
DA ÁGUA NO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

T
9/1/78

Tese Apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como Parte das Exi-
gências do Curso de Mestrado em Enge-
nharia Agrícola, para a Obtenção do
Grau de "Magister Scientiae".

VIÇOSA - MINAS GERAIS

1978

DETERMINAÇÃO E ANÁLISE DA UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO
DA ÁGUA NO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR ASPERSÃO

por

REINALDO LÚCIO GOMIDE

APROVADA:


Prof. Salassier Bernardo
(Orientador)


Prof. Manoel Vieira


Prof. Gilberto C. Sedyama


Prof. Paulo Afonso Ferreira


Prof. Peter John Martyn

A meus pais e manos.

A minha esposa, Zuilma.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Conselho de Pós-Graduação, pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), pela oportunidade concedida para realização deste curso.

À Coordenadoria do Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de ajuda financeira durante o curso.

Ao Professor Salassier Bernardo pela valiosa orientação e estímulo recebido.

Ao professor Manoel Vieira, pela sua atenção, orientação na elaboração do programa no computador e nas análises de regressão.

Ao Professor Gilberto C. Sediyaama, pelas excelentes sugestões e esclarecimentos.

Aos auxiliares do Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da ESA - U.F.V., pelo auxílio prestado nos trabalhos de campo.

Às senhoritas Rachel de Castro Quintão e Maria do Carmo da Silva, pelos notáveis trabalhos de datilografia.

Finalmente, a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

BIOGRAFIA DO AUTOR

REINALDO LÚCIO GOMIDE, filho de José Bayllon Gomide e Elza Barduni Gomide, nasceu aos 30 dias de novembro de 1952, em Viçosa, estado de Minas Gerais.

Concluiu o curso primário em 1963, no Grupo Escolar Edmundo Lins; o ginásial, em 1968, no Colégio Raul de Leoni; o científico, em 1971, no Colégio Universitário da Universidade Federal de Viçosa, todos em Viçosa, Minas Gerais.

Concluiu o curso superior em 1975, na Escola Superior de Agricultura da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, diplomando-se em Agronomia, diversificado em Engenharia Agrícola.

Em 1976, foi admitido pela EMBRAPA como pesquisador, ano em que iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, na área de Irrigação.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
EXTRATO	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5. RESUMO E CONCLUSÕES	61
6. LITERATURA CITADA	63
APÊNDICE	67
A - Tabela dos dados coletados em cada ensaio	67
B - Velocidade de rotação setorial do aspersor	71
C - Velocidade média do vento, em intervalos de 10 minutos	75
D - Temperatura e umidade relativa do ar	79
E - Ficha utilizada para anotações dos volumes de água coletados pelos pluviômetros e de outros dados de ensaio	86

LISTA DE QUADROS

QUADRO		Página
1	Espaçamento em função da velocidade do vento	17
2	Espaçamentos recomendados por Schwab <u>et alii</u> em função da velocidade do vento	19
3	Coeficientes de uniformidade de Christiansen em função do espaçamento e da velocidade do vento	20
4	Superposição das quantidades de água coletadas pelos pluviômetros, empregando o modelo matemático (XI) e considerando um sistema de irrigação por aspersão com espaçamento de 12 x 12 m. Os valores de precipitação obtidos estão em milímetros	39
5	Saída do programa	43
6	Resultados da análise dos parâmetros	45
7	Resultados da análise de variância da regressão	45

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Página
1	Distribuição da água em torno de um aspersor rotativo, operando com diferentes pressões: A - pressão baixa demais, B - pressão alta demais e C - pressão satisfatória (caso normal)	21
2	Disposição dos pluviômetros em relação ao aspersor na área onde foram realizados os testes de distribuição da água	30
3	Sistema de eixos coordenados estabelecido. A origem, constituída pelo aspersor, tem coordenadas nulas (0,0). O eixo y ficou na direção norte-sul e o x na direção leste-oeste	34
4	Ilustração da unidade de medida das abscissas e das ordenadas. As letras A a Q representam os aspersores, P(IX,IY) representa o pluviômetro de coordenadas IX e IY, IDY é o espaçamento entre linhas laterais, IDX é o espaçamento entre os aspersores ao longo da linha lateral e CQ é o comprimento da quadrícula	35
5	Coordenadas do pluviômetro P em relação a cada um dos 16 aspersores que foram considerados para efetuar a superposição da água aplicada	37
6	Fluxograma do programa usado para fazer a superposição e calcular os coeficientes de uniformidade	41

FIGURA

Página

7	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 0 m/s	47
8	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 1,0 m e uma velocidade de vento de 0 m/s	48
9	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 1,5 m e uma velocidade de vento de 0 m/s	49
10	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 2,0 m e uma velocidade de vento de 0 m/s	50
11	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 2 m/s	52
12	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 4 m/s	53
13	Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes velocidades do vento, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e um espaçamento entre aspersores ao longo da lateral de 18 m	55

FIGURA

Página

14	Coefficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes velocidades de vento, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e um espaçamento entre aspersores ao longo da lateral de 30 m	56
15	Coefficiente de uniformidade de Christiansen versus velocidade do vento, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral (EA) e entre linhas laterais, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m	58
16	Coefficiente de uniformidade de Christiansen versus altura do tubo de elevação, para diferentes velocidades de vento, considerando um espaçamento de 18x18m	59

EXTRATO

GOMIDE, Reinaldo Lúcio, M.S., Universidade Federal de Viçosa, julho de 1978. Determinação e análise da uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. Professor Orientador: Sallasier Bernardo. Professores Conselheiros: Manoel Vieira e Gilberto C. Sedyama.

Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para calcular a uniformidade de distribuição de água na irrigação por aspersão. Como medida desta uniformidade usaram-se as seguintes expressões: coeficiente de uniformidade de Christiansen, "novo coeficiente" de uniformidade, proposto por Benami e Hore, "pattern efficiency", coeficiente estatístico de uniformidade de Wilcox e Swailes e o coeficiente de variação.

Os cálculos baseiam-se em dados de precipitação de um único aspersor, obtidos de pluviômetros dispostos sobre a superfície do solo e na simulação de sistemas de irrigação por aspersão, com os seguintes espaçamentos entre linhas laterais e entre aspersores ao longo da lateral: 12 x 12, 18 x 12, 18 x 18, 24 x 12, 24 x 18, 24 x 24, 30 x 12, 30 x 18, 30 x 24 e 30 x 30 m. O modelo de distribuição de água de um único aspersor foi considerado para representar a distribuição de um sistema de irrigação. Para tanto, efetuou-se a superposição das lâminas de á-

gua, de acordo com os espaçamentos usados.

Os trabalhos de campo foram conduzidos em área plana, localizada próximo ao Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa - MG. Elaborou-se um programa de computador para efetuar os cálculos relativos à superposição e determinação dos coeficientes.

Procurou-se, também, estudar os efeitos dos seguintes fatores sobre a uniformidade de distribuição: espaçamentos entre os aspersores, ao longo e entre linhas laterais; altura do tubo de elevação do aspersor; pressão no bocal e velocidade do vento. Uma equação de regressão múltipla foi usada para estimar o coeficiente de uniformidade de Christiansen, usando como variáveis os fatores estudados. Escolheu-se este coeficiente pelo fato de ser o mais empregado.

A equação estabelecida apresentou um coeficiente de determinação de 0,96, e foi a seguinte:

$$\begin{aligned} \text{CUC} = & 55,207 + 3,195 \text{ EL} + 1,614 \text{ EA} + 5,918 \text{ VEV} + 2,204 \text{ ATU} - \\ & - 0,103 \text{ EL}^2 - 0,048 \text{ EA}^2 + 0,253 \text{ VEV}^2 - 0,352 \text{ EL} \times \text{VEV} - \\ & - 0,221 \text{ EA} \times \text{VEV} \end{aligned}$$

onde: CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (%),

EL = espaçamento entre linhas laterais (m),

EA = espaçamento entre aspersores ao longo da linha lateral (m),

VEV = velocidade média do vento a 2 m de altura (m/s),

ATU = altura do tubo de elevação (m).

Diante dos resultados obtidos nas condições em que foram realizados os testes, recomendam-se os seguintes espaçamentos, com as respectivas velocidades de vento, para que se obtenha um coeficiente de uniformidade de Christiansen acima de 80% :

<u>Espaçamento</u> <u>(m x m)</u>	<u>Velocidade do Vento</u> <u>(m/s)</u>
18 x 18	menos de 4,0
24 x 12	menos de 1,5
24 x 18	menos de 1,3
24 x 24	menos de 0,6

Conclui-se, portanto, que deve haver uma redução no espaçamento à medida que aumenta a velocidade do vento.

Considerando nulo o efeito do vento, o espaçamento de 24 x 24 m forneceu um coeficiente aceitável (acima de 80%).

Constatou-se um maior efeito do vento para as maiores alturas do tubo de elevação.

O coeficiente de Christiansen foi mais influenciado pelo vento do que pela altura do tubo de elevação.

1. INTRODUÇÃO

A irrigação por aspersão constitui um dos métodos mais usados nestes últimos tempos. Concorreu para isso a uniformidade de aplicação de água, a elevada eficiência do sistema, o fácil controle do volume de água a ser aplicado em cada irrigação, a possibilidade de aplicação de fertilizantes diluídos na água, a facilidade de automatização, a possibilidade de eliminar os perigos de erosão e a potencialidade de seu emprego nas mais diversas topografias e tipos de solos.

A uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão é um importante parâmetro a ser determinado para se obter melhor eficiência de aplicação. Sua determinação baseia-se nas medidas da água coletada numa série de recipientes de igual tamanho, seção e volume, que se acham distribuídos sobre uma superfície do solo ou sobre estacas, para evitar a interferência da folhagem das culturas com a distribuição da água pelo aspersor. Estes podem encontrar-se igualmente espaçados ao redor de um único aspersor, numa área coberta por aspersores situados numa mesma linha lateral ou numa área entre duas laterais.

Há diversas expressões numéricas que servem para determinar a uniformidade de distribuição da água pelos aspersores (4, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 17, 18, 25, 26, 27, 30). Tais expressões permitem uma análise dos modelos de distribuição de água originados pelos aspersores e, tam

bém, verificar que os espaçamentos entre os aspersores, bem como uma série de outros fatores, influem na uniformidade de aplicação, podendo provocar uma redução na eficiência do sistema. Estudos detalhados envolvendo tais fatores devem ser realizados, de modo que o sistema possa ter um bom desempenho.

Assim, para um mesmo modelo de aspersor, seria obtido um valor diferente de uniformidade de distribuição para cada espaçamento e, desde que este pode ser igual ou diferente nas duas direções, isto é, entre linhas laterais e entre aspersores ao longo da mesma linha lateral, são requeridos muitos cálculos para analisar completamente um modelo de distribuição do aspersor e determinar qual o espaçamento que resultará numa distribuição mais uniforme, a qual influirá na eficiência do sistema, bem como na produção da cultura que está sendo explorada.

Baseado nisso, procurou-se elaborar, neste estudo, um programa de computador para calcular a uniformidade de distribuição da água na irrigação por aspersão, usando as seguintes expressões: coeficiente de uniformidade de Christiansen, "novo coeficiente" de uniformidade, proposto por Benami e Hore, "pattern efficiency", coeficiente estatístico de uniformidade de Wilcox-Swales e o coeficiente de variação. Os cálculos basearam-se em dados de precipitação do aspersor, que foram obtidos de pluviômetros dispostos sobre a superfície do solo, e na simulação de sistemas de irrigação com os seguintes espaçamentos, em metros: 12x12, 18x12, 18x18, 24x12, 24x18, 24x24, 30x12, 30x18, 30x24 e 30x30.

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver uma equação para a determinação e análise do coeficiente de uniformidade de Christiansen em função da altura do tubo de elevação do aspersor, da pressão no bocal, da velocidade média do vento, do espaçamento dos aspersores ao longo da lateral e do espaçamento entre linhas laterais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Vários autores (3, 8, 12, 15, 25, 32) são unânimes em afirmar que o rendimento da cultura está estreitamente relacionado com a uniformidade de distribuição da água. A irrigação por aspersão tem apresentado excelentes resultados nos processos de aumento deste rendimento em culturas onde sua utilização pode ser perfeitamente vista como necessária, visando a suprir as deficiências de umidade do solo em determinadas épocas do ano.

CHRISTIANSEN (8), FRY e GRAY (17) citam que a uniformidade obtida depende do tipo de modelo de distribuição produzido e do espaçamento dos aspersores. Alguns outros fatores, como velocidade e direção do vento, velocidade de rotação do aspersor, pressão de serviço, altura do tubo de elevação, diâmetro do bocal, são importantes e também influem na uniformidade de distribuição da água pelos aspersores.

Várias indústrias e experimentadores têm dado muita consideração ao efeito da superposição da lâmina de água a qual está diretamente ligada ao espaçamento e ao perfil de distribuição do aspersor, e baseado nela têm tentado obter um melhor modelo de distribuição da água.

De acordo com PAIR (25), a correta instalação, seleção e operação do aspersor é que vai determinar a eficiência do sistema, permitindo uma boa uniformidade na distribuição da água.

Eljanani, citado por FERREIRA (15), informa que, sendo a vazão do aspersor uma função do diâmetro do bocal e da pressão, os aspersores devem funcionar dentro dos limites adequados de pressão, a fim de assegurar um modelo ótimo de distribuição.

Diversos autores (8, 12, 17, 25, 26, 32) afirmam que o comprimento do tubo de elevação tem considerável influência sobre a uniformidade de distribuição da água pelo aspersor.

Hart e Reynolds, citados por FERREIRA (15), esclarecem que o perfil de distribuição dos valores de precipitação de um aspersor aproxima-se bastante da distribuição normal, para uma grande variação de vazão dos aspersores (de 0,3 a 18,9 l/s).

HART (18) esclarece que muitos parâmetros usados nas avaliações da distribuição de água pelo aspersor são baseados em observações de precipitação dentro de um arranjo de modelos de superposição de valores de precipitação de vários aspersores. Este arranjo pode ser desenvolvido de várias maneiras. Uma delas é colocar os aspersores em determinado espaçamento a ser investigado. Neste caso, todos os aspersores são operados durante o teste, de modo que a água lançada por eles na área em estudo fosse incluída nos cálculos da distribuição. Com isso haveria superposição de vários jatos, dependendo do espaçamento usado. Outro método bastante usado é aquele que utiliza um único aspersor, com pluviômetros dispostos ao redor para coletar a água precipitada. Posteriormente, faz-se a simulação dos diversos espaçamentos, originando superposições, e, por meio do coeficiente de uniformidade, verifica-se qual deles é o melhor. Este método tem como principal vantagem requerer menos tempo para a realização dos testes.

DAVIS (13) coletou os dados para as análises de um sistema empregando 4 linhas laterais de 76,2 mm de diâmetro, espaçadas de 15 m. Ao longo de cada lateral usou 8 aspersores rotativos, com um bocal de 4,36 mm de diâmetro, espaçados de 9 m e colocados sobre tubos de eleva

ção de 0,5 m de comprimento. Selecionou uma área central retangular, denominada área padrão, de 9 x 15 m, para coletar amostras de água dos aspersores circundantes. Suas conclusões foram as seguintes:

1. Para os sistemas de aspersão que distribuem a água desuniformemente, uma densidade dos pluviômetros, representando áreas de amostragem de 0,25 a 6,7% da área padrão, não exerceu efeito sobre a lâmina d'água média calculada. O erro máximo observado para uma malha de 3 m foi de 2,3% da verdadeira média. O erro-padrão da média estava inversamente relacionado com a raiz quadrada do número de pluviômetros e foi aproximadamente igual a 5% para uma malha de 3 m.

2. O uso de uma única fileira de pluviômetros para estimar a profundidade de aplicação média resultou em grandes erros - acima de 20% da verdadeira média. O espaçamento entre cada pluviômetro, para um número mínimo de pluviômetros e um erro de 5% ou menos, em média, não seria maior que 10% da distância entre linhas laterais e pelo menos duas fileiras de pluviômetros perpendiculares às linhas laterais deveriam ser usadas.

3. As variações das quantidades de água coletadas pelos pluviômetros foram influenciadas pela densidade desses pluviômetros, principalmente entre as malhas de lado igual a 0,6 e 1,5 m. Contudo, os valores dos desvios permaneceram essencialmente os mesmos, e os histogramas dos três modelos selecionados para comparação foram similares.

4. A densidade de pluviômetros de 0,25 a 6,67% da área padrão, nos modelos de distribuição razoavelmente uniformes, não influenciou os valores do coeficiente de uniformidade de Christiansen, do coeficiente estatístico de uniformidade ou do "pattern efficiency". Contudo, para uma distribuição irregular, a diminuição da densidade dos pluviômetros resultou em valores mais elevados de todos estes parâmetros de distribuição. O "pattern efficiency" foi especialmente alterado. O espaçamento dos pluviômetros para uma distribuição ainda mais irregular

deveria representar, no máximo, 2,5% da área padrão.

5. Para os espaçamentos mais comumente usados na aspersão (9x15, 12x12, 12x18 m, etc.), um tamanho de malha de 1,5 m é tão bom quanto o de 0,6 m e resulta em dados mais acurados do que o de 3 m. Outros espaçamentos devem apresentar um tamanho de malha equivalente a 5 ou 6% do diâmetro molhado ou a 2,5% da área padrão.

Muitos testes têm sido realizados para determinar a uniformidade de distribuição da água na aspersão. Staebner, citado por CHRISTIANSEN (8), conduziu uma série de testes, nos U.S.A., com aspersores Americano e Alemão. A água foi coletada em recipientes localizados a várias distâncias do aspersor. Para muitos de seus testes Staebner usou 112 pluviômetros numa área quadrada de lado igual a 30,48 m. Conduziu, também, diversos testes, na Alemanha, usando a mesma metodologia. Staebner considerou que os aspersores testados distribuíam a água de tal modo que a lâmina máxima não excedia mais do que duas vezes a mínima, exceto perto das margens da área coberta pelo aspersor. O autor não discutiu a questão da superposição, nem do espaçamento adequado.

DYLLA e SHULL (14) estudaram um método para estimar as perdas por percolação na irrigação por aspersão que se baseou no total de água aplicada sobre determinada área, no deficit de umidade do solo e no coeficiente de uniformidade da distribuição da água. Recomendam que não constitui boa prática deixar o solo na sua capacidade máxima de armazenamento de água após uma irrigação, pois pode ocorrer uma chuva e haver grandes perdas de água e fertilizantes (percolação e lixiviação).

SHEARER e WOLFE (28) esclarecem que pesquisas que envolvam a aspersão em áreas de moderados a altos ventos constitui um sério problema, porque altera a distribuição da água, mesmo em instalações fixas estreitamente espaçadas, sendo, portanto, frequentemente inaceitável o valor de coeficiente de uniformidade obtido. Estudaram o sistema em que as linhas laterais deslocavam-se continuamente sobre a área irrigada

enquanto estavam sendo operadas, e obtiveram um desempenho satisfatório deste sistema, mesmo em condições de ventos, parecendo ser adaptável ao campo.

Shearer e Pair, citados por SHEARER e WOLFE (28), realizaram testes de distribuição da água usando o sistema em que as linhas laterais eram montadas sobre rodas e se moviam continuamente enquanto irrigavam a área de forma geralmente retangular. Encontraram valores de coeficientes de uniformidade de Christiansen de 89 a 95%, em condições de vento variando, em média, de 1,3 a 4,4 m/s.

Há uma perda apreciável de água por evaporação quando o sistema de irrigação por aspersão é usado em regiões muito quentes e secas e de elevadas intensidades de vento (8, 10, 14, 16, 25, 26, 28).

Frost e Schwalen, citados por CLARK e FINLEY (10), mediram as perdas por evaporação da água nos aspersores no Arizona. Acharam uma boa correlação entre as perdas da água que era borrifada e o deficit da pressão de vapor do ar atmosférico. Muitos de seus testes foram conduzidos em velocidades de vento menores que 2,2 m/s e alguns entre 3,6 e 4,5 m/s. Concluíram que, dobrando a velocidade do vento, as perdas praticamente se dobravam.

CHRISTIANSEN (9) estimou as perdas por evaporação na aspersão usando o método de recolhimento da água em pluviômetros, de 10 a 42% para os testes realizados à tarde e de aproximadamente 4% para aqueles conduzidos de manhã cedo. Não realizou estudos para diferentes condições de clima, mas concluiu que as perdas eram mais elevadas em dias de vento, quentes e secos.

Hermsmeier, citado por CLARK e FINLEY (10), estudou a evaporação da água nos aspersores no Imperial Valley da California. Achou que a temperatura do ar e a intensidade de aplicação da água pelo aspersor eram melhores fatores para estimar a evaporação da água que a velocidade do vento ou umidade relativa do ar.

CLARK e FINLEY (10) estudaram as perdas por evaporação na irrigação por aspersão na região que é constituída pelas partes do oeste de Kansas, Oklahoma, Texas e do leste de Colorado e New México. Esta área apresenta pouca precipitação, baixa umidade relativa do ar, elevadas intensidades de vento e altas temperaturas durante o verão. Trabalharam com um sistema constituído de 3 linhas laterais espaçadas de 12 m e 5 aspersores em cada lateral, espaçados de 9 m. A área útil foi de 36x45 m. Colocaram entre os aspersores 48 pluviômetros espaçados de 1,5 x 1,5 m. Realizaram testes em duas áreas, simultaneamente, para comparar dois diâmetros de bocais de 3,97 e 4,36 mm. Por meio de válvulas individuais, regularam a pressão e a vazão para cada linha lateral. Os dados climáticos medidos incluíram: temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e velocidade e direção do vento. Determinaram as perdas em função da quantidade de água aplicada pelo aspersor, do volume de água que alcançou a superfície do solo, da velocidade do vento, da umidade relativa do ar, da temperatura do ar e da pressão de operação do aspersor. Chegaram às seguintes conclusões:

1. Houve pequenas diferenças na perda por evaporação quando se compararam os dois bocais, examinados ao mesmo tempo, sob as mesmas condições climáticas.

2. As perdas podiam ser estimadas pela seguinte equação:

$$E = 3,14 U + 0,21 E_d + 0,02 p - 0,05 T - 14,58$$

$$r = 0,95$$

onde: E = perda de água devido a evaporação (%),
 U = velocidade média do vento (m/s),
 E_d = deficit da pressão de vapor do ar (milibars),
 p = pressão da água no bocal do aspersor (kilopascal),
 T = temperatura do ar (°C),
 r = coeficiente de determinação.

A temperatura do ar e a pressão da água no bocal influenciaram pouco a evaporação. Uma posterior análise desta equação mostrou que 79% da variação das perdas foram explicados pela velocidade do vento e 9% pelo deficit de pressão de vapor do ar.

3. Quando a velocidade média do vento foi menor que 4,5 m/s, as perdas por evaporação foram geralmente menores que 10% e o deficit de pressão de vapor tinha a maior influência no total de evaporação.

4. As perdas cresceram esponencialmente com a velocidade média do vento quando esta assumiu valores entre 4,5 e 8,5 m/s e variaram de 10 a 30%. Nestas condições, o vento foi o fator predominante.

CHRISTIANSEN (8) determinou uma equação para o cálculo do coeficiente de uniformidade, a qual é atualmente muito usada:

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

onde: CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen (%),
 X_i = precipitação obtida do pluviômetro de ordem i (mm),
 \bar{X} = precipitação média (mm),
 n = número de amostras coletadas,
 $\sum |X_i - \bar{X}|$ = somatório dos valores absoluto dos desvios.

Segundo DAVIS (13), o coeficiente estatístico de uniformidade, estudado por Wilcox-Swales, é um método de limitada aplicação, pela dificuldade em determinar sua validade por meio de métodos estatísticos. Contudo, tem sido usado nas análises de distribuição de água pelos aspersores. É definido pela seguinte equação:

$$CEU = 100 - C$$

onde: CEU = coeficiente estatístico de uniformidade (%),

C = coeficiente de variação (%), definido por

$$C = 100 \frac{s}{\bar{X}} \quad (V)$$

s = desvio-padrão dos dados de precipitação,

\bar{X} = precipitação média (mm). Substituindo o valor de C, a equação torna-se:

$$CEU = 100 \left(1 - \frac{s}{\bar{X}} \right) \quad (II)$$

DAVIS (13) cita que o "pattern efficiency" é uma expressão que dá ênfase à parte da área coberta pelos aspersores que recebe precipitações mais baixa, isto é, representa a percentagem da média dos 25% menores valores de precipitação. Aconselha-se fazer uma ordenação crescente dos valores de precipitação, para posteriormente selecionar os 25% menores. É representado pela seguinte equação:

$$PEF = 100 \frac{\bar{x}}{\bar{X}} \quad (III)$$

onde: PEF = "pattern efficiency" (%),

\bar{x} = média das mais baixas precipitações de 25% dos pluviômetros (mm),

\bar{X} = precipitação média, levando-se em consideração a água coletada por todos pluviômetros (mm).

Segundo HART (18), o USDA recomenda o "pattern efficiency" para a avaliação da uniformidade de distribuição da água dos sistemas de ir

rigação por aspersão.

BENAMI e HORE (4) propuseram uma nova equação para avaliar a uniformidade de distribuição que denominaram "novo coeficiente". Esta expressão é baseada na consideração dos desvios do grupo de leituras abaixo da média geral e do grupo acima da média geral:

$$\begin{aligned} \text{NCU} &= C_1/C_2 \\ C_1 &= M_b - \sum |X_b| / N_b \\ C_2 &= M_a + \sum |X_a| / N_a \end{aligned} \quad (\text{IV})$$

onde: NCU = novo coeficiente,

M_a = média do grupo de leituras acima da média geral,

M_b = média do grupo de leituras abaixo da média geral,

N_a e N_b = número de leituras acima e abaixo da média geral, respectivamente,

$|X_a|$ = desvio absoluto de M_a do grupo de leituras individual acima da média geral,

$|X_b|$ = desvio absoluto de M_b do grupo de leituras individual abaixo da média geral.

BRANSCHIED e HART (7) determinaram métodos para utilizar os modelos de distribuição de água de um único aspersor na predição da distribuição para a área que vai ser irrigada, utilizando um sistema fixo. Realizaram testes com um único aspersor e com uma linha lateral com 13 aspersores espaçados de 9 m. Estes dois sistemas podiam ser operados independentemente. A água foi coletada em pluviômetros dispostos sobre o solo em forma de malha quadrada de 3 m de lado. Ambas as instalações foram operadas ao mesmo tempo, de modo que suas condições climáticas permanecessem similares. Desta forma, o modelo de aplicação de água de um único aspersor foi ordinariamente assumido para representar o modelo de um sistema fixo, quando se efetuou a superposição das lâminas de

água de acordo com o espaçamento dos aspersores usado no campo. Os modelos de distribuição obtidos pela linha lateral, quando superpostos, forneceram a distribuição de um sistema fixo. Para medir a uniformidade de distribuição da água usaram o coeficiente de uniformidade da "Hawaiian Sugar Planters' Association" (UCH). Baseado na comparação destes coeficientes dos dois sistemas, concluíram que o procedimento de se fazer a superposição dos dados de um único aspersor é perfeitamente válido.

CHU e ALLRED (11) citam que um dos problemas importantes na designação de um sistema de irrigação usando aspersores de rotação é o arranjo dos aspersores, de modo que a distribuição da água sobre a área irrigada seja uniforme. Considerando que num ar parado a vazão e a velocidade de rotação de um aspersor isolado sejam mantidos uniformes com o tempo, a profundidade da água aplicada por este aspersor deve ser uma função axialmente simétrica, isto é, a profundidade da água em algum ponto é uma função da distância deste ponto ao aspersor e é independente da orientação deste ponto. Deste modo, o adequado espaçamento dos aspersores é muito importante para que se tenha uma distribuição mais uniforme.

LOPEZ (22) menciona que o fenômeno climático de consideração mais importante na aspersão é o vento, devendo-se ter, por um lado, uma idéia aproximada de sua velocidade, que desempenha um papel significativo na eficiência de aplicação e, por outro, de sua direção, que deve ser levada em conta nas disposições das tubulações. Esclarece ainda que as altas temperaturas e a baixa umidade relativa do ar diminuem a eficiência do sistema, aumentando as perdas por evaporação.

CHRISTIANSEN (8) realizou uma série de testes com aspersores comerciais, em Davis, California, para obter informação definida sobre a distribuição da água em diversas condições e especialmente para determinar o efeito do vento, da velocidade de rotação e do espaçamento en-

tre aspersores sobre a uniformidade de distribuição. Para os primeiros 122 testes mediu a chuva em pluviômetros de 62,5 mm de diâmetro dispostos dentro da área coberta pelo aspersor com um espaçamento de 3 x 3 m, exceto nos eixos norte-sul e leste-oeste, onde foram espaçados de 1,5 m. Para os testes subsequentes (123 a 170), um pluviômetro adicional foi colocado no meio de cada malha quadrada. Determinou a vazão do aspersor com um medidor calibrado para 25 mm; a pressão no bocal foi determinada com um manômetro. As velocidades do vento foram obtidas por meio de um anemômetro, modelo do U.S. Weather Bureau, instalado 3 m acima do solo. A umidade e a temperatura do ar foram determinados com um psicrômetro de Funda. A água coletada pelos pluviômetros foi medida por uma proveta graduada em centímetros cúbicos. Baseado nestes testes, CHRISTIANSEN (8) chegou às seguintes conclusões:

1. Os modelos de distribuição típicos foram obtidos quando a velocidade de rotação dos aspersores não excedeu duas rotações por minuto, a velocidade do vento não atingiu 1,3 m/s e a pressão de serviço foi adequada, de modo que se obtivesse uma satisfatória dispersão das partículas d'água e um desejado perfil de aplicação.

2. Os testes realizados com uma baixa pressão de serviço (1,4 bar) apresentaram um círculo úmido nas bordas da área coberta pelo aspersor, onde a profundidade de aplicação foi várias vezes maior que aquela à distância de 3 a 6 m do aspersor. Isto fez com que a distribuição da água seja muito irregular. Outra notável característica foi a diminuição do círculo úmido, que apresentou um diâmetro médio de 27 a 30 m, quando comparado com diâmetro maior do que 36 m, para pressão de serviço de 2,8 a 3,5 bares. A redução da área coberta pelo aspersor foi aproximadamente proporcional à redução de sua vazão, devida à baixa pressão. A velocidade de aplicação média não variou significativamente com a redução da pressão.

3. O vento exerceu grande influência sobre os modelos de distribuição, arrastando a água mais distante no seu sentido. Com isto, a á-

rea coberta pelo aspersor foi apreciavelmente reduzida. Ocorreu elevada concentração de água perto do aspersor, especialmente na direção normal à direção do vento, e uma deficiência no lado oposto ao sentido do vento. Embora os modelos resultados pareçam muito irregulares, o efeito do vento na uniformidade de distribuição sobre uma grande área, com os aspersores bastante juntos, a fim de fornecer uma superposição adequada, foi menos sério do que irregularidades devidas a outras causas, tal como variação na velocidade de rotação.

4. A alta velocidade de rotação do aspersor resultou em grande redução da área coberta pelo aspersor. Tal redução foi muito maior que a provocada pelo abaixamento de pressão. A velocidade de aplicação média da água aumentou, chegando a exceder 25 mm/h. Isto deve ser comparado com uma velocidade de aplicação média de menos de 6 mm/h, para o mesmo aspersor, quando operado com uma velocidade de rotação lenta (1 a 2 rpm). A elevada velocidade de rotação aumentou o desgaste do aspersor nos pontos de apoio e nos eixos. Os aspersores devem ter menor espaçamento quando rotacionados rapidamente, para assegurar boa uniformidade de distribuição.

5. Variações da velocidade de rotação média do aspersor nos 12 setores de 30 graus descritos em cada revolução completa acarretaram distribuições irregulares. Houve maior concentração de água nos setores em que o aspersor apresentou menor velocidade de rotação. As posições de máxima e mínima velocidade de rotação podem ocorrer em qualquer direção, e a variação da rotação não foi devida ao vento, como se pensava, mas ao atrito no ponto de apoio (suporte), quando o aspersor esteve em diferentes posições.

Segundo Gray, citado por BARRETO (3), os fabricantes de aspersores norte-americanos aconselham que o jato emitido por um aspersor deve atingir o aspersor seguinte; os europeus recomendam superposição dos jatos de apenas 25 a 30% de seu raio de alcance.

PAIR (26) salienta que é importante o papel da infiltração da água no solo no sistema de irrigação por aspersão, e esclarece que a intensidade de aplicação média do aspersor deve ser menor ou igual à velocidade de infiltração básica do solo, para que não haja empocamento de água na superfície. Em razão disso, torna-se difícil irrigar por aspersão os solos que apresentam velocidade de infiltração menor que 2,5 mm/h. No entanto, a aspersão é o melhor método a ser usado em solos que têm alta velocidade de infiltração, porque se pode controlar adequadamente a quantidade de água a ser aplicada, reduzindo, desta maneira, as perdas por percolação.

A distribuição da água varia com o tipo de aspersor e com o bocal designado. A maioria dos aspersores usados na agricultura nos U.S.A. possui um, dois ou três bocais, com o tamanho variando de 1,56 mm a 50 mm de diâmetro. Destes, o mais comum é o de dois bocais, que apresenta um "bocal ejetor" de maior raio de ação, empregado para dar maior uniformidade na aplicação da água, possibilitando ao aspersor cobrir maior área, e um "bocal propulsor", empregado para borrifar a água nas regiões mais próximas do aspersor, fornecendo uma distribuição mais uniforme, além de imprimir o movimento de rotação por percussão (25).

PAIR (25), em seu estudo para determinar o efeito da pressão, da rotação dos aspersores, da superposição dos jatos de água, da velocidade do vento, da altura do tubo de elevação e da velocidade de aplicação média da água sobre a uniformidade de distribuição de água, concluiu:

1. O excesso de pressão causou grande dispersão do jato de água, redução no raio de ação e acúmulo de água perto do aspersor. Baixa pressão resultou em inadequada dispersão do jato e provocou distribuição irregular da água.

2. A velocidade de rotação do aspersor deve ser uniforme e lenta para garantir melhor distribuição. A variação na rotação foi possi-

velmente devida à oscilação da pressão, aos desgastes, aos entupimentos, aos defeitos relativos à construção dos aspersores e à manutenção inadequada a eles atribuída.

3. Para assegurar uma aplicação uniforme da água, deve haver superposição dos jatos de água nos dois sentidos, isto é, entre aspersores ao longo da lateral e entre as laterais. O grau da superposição requerido depende do tipo de perfil originado pelo aspersor, da pressão de operação, da velocidade e da direção do vento.

4. A distribuição da água foi bastante influenciada pelo vento. A altura do tubo de elevação, o tamanho das gotas de água e a velocidade e a direção do vento definiram a grandeza da distorção da água. As maiores irregularidades de distribuição foram encontradas para velocidade de vento mais elevada, menor diâmetro da gota e maior altura do tubo de elevação. Medições feitas em Idaho mostraram que uma velocidade média do vento de 1,3 m/s apresentou uma infiltração em todas as partes da área coberta pelos aspersores. Quando esta velocidade foi de 5,8 m/s, 40% da área umedecida por uma linha lateral apresentaram uma baixa infiltração, tendo ocorrido escoamento superficial. Isto demonstrou que o vento pode aumentar a intensidade de aplicação média em determinadas regiões da área coberta pelos aspersores.

5. As maiores alturas do tubo de elevação (2 a 3 m) forneceram melhor uniformidade de aplicação da água. Estas, porém, em condições de vento, apresentaram maior distorção do modelo de distribuição da água.

6. A intensidade de aplicação média do aspersor não deve exceder a capacidade do solo para absorver a água.

O ângulo do jato de muitos aspersores usados na agricultura está em torno de 30 graus em relação ao plano horizontal que passa pelas extremidades de seus bocais. O baixo ângulo de inclinação do bocal varia de 0 a 15 graus e é usado para irrigar pomares e pequenos bosques, para fornecer uma trajetória quase plana ao jato, evitando o umedeci-

mento das folhagens de tais plantas (25).

PAIR (25) salienta que o sistema de irrigação por aspersão precisa de alguns valores nos quais se possa basear a seleção de seus aspersores. As fábricas especificam as combinações entre tamanho e pressão do bocal para determinado diâmetro molhado, que são considerados nesta escolha. Certos critérios devem ser levados em conta na determinação do espaçamento. Estes critérios são baseados na percentagem do diâmetro molhado do aspersor para certas velocidades de vento e encontram-se no Quadro 1.

QUADRO 1 - Espaçamentos em função da velocidade do vento.

Velocidades de vento (m/s)	Espaçamento entre linhas laterais (% do diâmetro molhado)
sem vento	65
0 - 2,2	60
2,2 - 4,5	50
acima de 4,5	22 - 30

CHRISTIANSEN (8) estudou a distribuição da água para certos tipos de perfis geométricos. Salientou que o perfil de distribuição resultante será simétrico em relação ao centro, se o aspersor for rotacionado à uma velocidade uniforme e estando o ar parado (sem vento). Baseado nisso, analisou vários tipos de perfis simétricos de diferentes formas geométricas para determinar a uniformidade de distribuição, segundo alguns espaçamentos.

Segundo CHRISTIANSEN (8), o espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral e entre laterais deve ser reduzido para velocidades de vento mais elevadas. Em locais em que a direção do vento é bastante variável, o espaçamento deve aproximar-se da forma quadrada, que geral-

mente fornece melhor uniformidade de distribuição. Alternando-se o espaçamento dos aspersores nos dois sentidos, isto é, ao longo da lateral e entre as laterais, há distribuição mais uniforme da água.

De acordo com PAIR (25), a eficiência total de aplicação dos aspersores varia de 70%, em áreas quentes e áridas, a 85%, em regiões úmidas e frias. Os fatores que alteram, direta ou indiretamente, esta eficiência são: tamanho da gota da água, temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa do ar e intensidade de aplicação do aspersor.

Levine, citado por PAIR (25), estudou o efeito do tamanho das gotas de água produzidas por um aspersor, operando sob condições variadas de tamanho de bocal e pressão, sobre a capacidade de infiltração e desdobramentos de agregados do solo. O tamanho médio das gotas foi medido no campo até certa distância do bocal, para velocidade do vento de 0 m/s. Não foi possível estimar o tamanho das gotículas da fina névoa evidente às pressões mais altas. Esclareceu que parte da energia cinética das gotas de maior diâmetro é consumida no desdobramento ou na remoção dos agregados do solo. Estes agregados desdobrados obstruíam a camada superficial ou deslocavam a superfície do solo até que esta ficasse impermeabilizada. Isto acarretou uma interferência com o movimento de ar do solo, tanto para o exterior como para o interior, que é essencial para o desenvolvimento normal da planta e infiltração da água.

Eljanani, citado por FERREIRA (15), sugere que a irrigação por aspersão deve ser feita em períodos do dia em que a velocidade do vento não ultrapasse 2,5 m/s. Por sua vez, Pera, citado por FERREIRA (15), informa que o vento constitui um sério inconveniente, e as distorções na aplicação, por ele causadas, podem ser diminuídas utilizando-se a disposição dos aspersores em forma de retângulos, com o lado maior (geralmente distância entre as linhas laterais) na direção do vento.

Segundo Schwab et alii, citados por FERREIRA (15), para diminuir o efeito do vento na aplicação de água de um sistema por aspersão

devem-se utilizar os espaçamentos apresentados no Quadro 2, que são máximos para aspersores de baixa e média pressão (2 a 4 bares), para as respectivas velocidades de vento.

Pillsbury, citado por FERREIRA (15), diz que, para a montagem da rede de pluviômetros, deve-se dividir a área circundante ao aspersor em quadrados iguais, e no centro de cada quadrado instalar um pluviômetro. Recomenda, também, que a área de cada quadrado deve ser tal que permita a utilização de 40 a 100 pluviômetros sobre a área molhada pelo aspersor.

QUADRO 2 - Espaçamentos recomendados por Schwab et alii em função da velocidade do vento.

Velocidade do vento (m/s)	Espaçamento entre aspersores de uma lateral (% do diâmetro molhado)	Espaçamento entre laterais (% do diâmetro molhado)
0	50	65
2 ou menor	45	60
2 a 4	40	50
4 ou maior	30	30

De acordo com FRY e GRAY (17), o vento é um dos principais fatores que alteram drasticamente a uniformidade de aplicação da água, uma vez que é difícil ou impossível controlá-lo. Contudo, uma escolha apropriada do espaçamento e de outros parâmetros envolvidos na distribuição da água pode minimizar o efeito do vento. Estes autores trabalharam com um aspersor, marca "Rain Bird", modelo 30 TNT, diâmetro dos bocais de 3,90 x 2,34 mm, pressão de serviço de 4,2 bares, e obtiveram os coeficientes de uniformidade indicados no Quadro 3, para duas condições distintas do vento (baixa e alta velocidade).

Os tubos de elevação prestam-se para eliminar ou reduzir a tur-

QUADRO 3 - Coeficientes de uniformidade de Christiansen (%) em função do espaçamento e da velocidade do vento.

Espaçamento (m)	Velocidade do vento (m/s)	
	1	4
12 x 12	92	84
15 x 15	88	63
18 x 18	80	31

bulência da água, quando esta é derivada da linha de irrigação para o aspersor, assegurando uma operação mais uniforme e eficiente deste último (12).

CHRISTIANSEN (8), DAKER (12) e PAIR (25) esclarecem que é importante estabelecer a pressão ideal de funcionamento do aspersor, de modo que seja possível melhor distribuição da água. Salientam que, para pressão baixa demais, a velocidade de saída da água diminui e a resistência do ar não é suficiente para desmanchar o jato d'água em pequenas gotas, à semelhança da chuva, podendo o jato ficar com um alcance ligeiramente maior que o calculado e cair pesadamente no solo, ficando a parte intermediária do terreno com baixa precipitação (Figura 1-A). Para os valores de pressão acima do ideal, a água emitida adquire alta velocidade, encontra grande resistência do ar e cai em forma de finíssima chuva mais nas proximidades do aspersor. Neste caso, o extremo do círculo permanece com baixa precipitação (Figura 1-B). A pressão adequada, associada a um bom espaçamento dos aspersores, de modo que haja superposição dos jatos, fornece uma distribuição mais uniforme (Figura 1-C).

A disposição dos aspersores ao longo e entre linhas laterais é feita obedecendo a uma rede de figuras geométricas regulares que, geralmente, podem ser em forma quadrada, retangular e triangular. A pri-

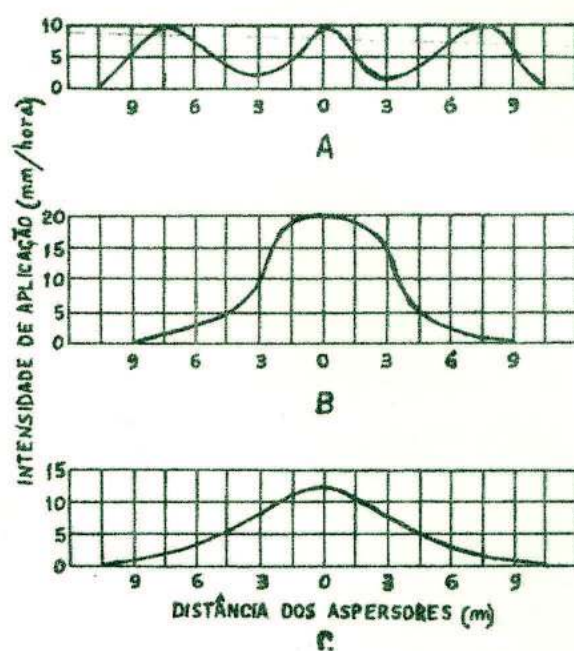


FIGURA 1 - Distribuição da água em torno de um aspersor rotativo, operando com diferentes pressões: A - pressão baixa demais, B - pressão alta demais e C - pressão satisfatória (caso normal).

meira, apesar de corresponder à cobertura mais desuniforme, é bastante usada. A segunda fornece uma boa uniformidade de cobertura, e talvez seja de uso mais generalizado. A terceira disposição, apesar de apresentar maior uniformidade de distribuição em relação às outras, é mais utilizada somente para os aspersores gigantes (12, 32).

DAKER (12) cita que as perdas por evaporação no sistema de irrigação por aspersão podem ser estimadas entre 2 e 8% do volume de água que passa pelo aspersor. Evidencia que o grau de pulverização da água exerce acentuada influência sobre tais perdas.

WIERSMA (33) estudou a superposição dos modelos de aplicação de água pelos aspersores em diversas condições de vento. Coletou os dados para as análises de um sistema, usando aspersores espaçados de 6,1, 9,1 e 12,2 metros; linhas laterais espaçadas de 12,2, 15,2, e 18,3 metros e pressões da água no bocal do aspersor de 2,0, 2,7, 3,3 e 3,8 bares. Encontrou 2,1 m/s como mais baixa velocidade do vento; a máxima não foi mencionada. Indicou, porém, graficamente, velocidades em torno de 8,0 m/s. Concluiu que:

1. Os tubos de elevação mais altos apresentaram uma uniformidade de distribuição superior em relação aos menores.
2. O ângulo formado pelo vento com a respectiva linha lateral teve pouco ou nenhum efeito sobre o modelo de distribuição da água.
3. As pressões mais elevadas foram superiores em relação às mais baixas e forneceram uma melhor distribuição da água.
4. Grandes quantidades de água por bocal resultaram em melhor aplicação do que pequenas quantidades.

SOLOMON (31) desenvolveu modelos teóricos de distribuição da água para oito modelos diferentes de aplicação de aspersores gigantes móveis. Calculou coeficientes de uniformidade para cada modelo superposto, usando vários espaçamentos. Para um modelo de distribuição atual, obtido em condições de campo, encontrou que a melhor distribui-

ção foi fornecida com espaçamentos, entre os aspersores, de 80 a 90% do diâmetro molhado. O autor não considerou o efeito do vento nos seus cálculos.

SHULL e DYLLA (30) estudaram o efeito do vento sobre o modelo de aplicação da água de um aspersor canhão, marca Nelson, modelo P 150, ângulo do jato de 24° e diâmetro do bocal de 25,4 mm. Durante os testes, o bocal do aspersor ficou 2,21 m acima da superfície do solo. Trabalharam com 3 anemômetros totalizadores, instalados a 2-4 e 8 m de altura, e um catavento, colocado a 1,2 m de altura. Efetuaram leituras de velocidade e direção do vento a intervalos de 5 minutos. O volume de água aplicado pelo aspersor foi medido em pluviômetros de 9,8 cm de diâmetro, espaçados de 6,1 m, em forma de malha quadrada, e colocados a uma altura de 91 cm. Determinaram o efeito do vento sobre a uniformidade de aplicação por comparação dos modelos de aplicação alterados pelo vento com modelos calculados não alterados pelo vento. Os modelos calculados, desenvolvidos em condições de baixa velocidade de vento, foram obtidos para pressões altas e baixas e apresentavam a mesma profundidade de água aplicada nos pontos equidistantes do aspersor. Escolheram como parâmetro, para indicar o efeito do vento sobre a distribuição, a média dos valores absolutos dos desvios entre as profundidades de água coletadas durante os testes e as profundidades correspondentes às mesmas posições dos modelos calculados. Concluíram que:

1. A média dos valores absolutos dos desvios aumentou quando os desvios em relação ao modelo calculado foram maiores. Isto ocorreu para maiores velocidades de vento.

2. A média dos valores absolutos dos desvios estava estreitamente relacionada com a velocidade do vento e a pressão da água no bocal do aspersor, podendo ser estimada pela seguinte equação:

$$\bar{D}_e = 0,17 U + 0,00047 P^{0,5} - 0,31$$

$$r = 0,9817$$

onde: \bar{D}_e = estimativa da média absoluta dos desvios,
 U = velocidade média do vento tomada a 4 m de altura (m/s),
 P = pressão da água no aspersor (Pa),
 r = coeficiente de **determinação**.

3. A velocidade do vento alterou o modelo de distribuição da água relativamente mais do que a pressão.

4. A uniformidade de aplicação da água diminuiu com o aumento da velocidade do vento e da pressão de operação do aspersor.

SHULL e DYLLA (29) estudaram a uniformidade de aplicação de um aspersor canhão móvel, operando sob condições de elevadas velocidades de vento. Conduziram alguns testes no campo, com o propósito de determinar o máximo espaçamento entre os aspersores para um valor mínimo de coeficiente de uniformidade de Christiansen de 0,85. Concluíram que:

1. O modelo de distribuição da água foi bastante alterado pelo vento.

2. Quando a direção do vento permaneceu aproximadamente paralela à direção de deslocação dos aspersores, foi necessário usar um espaçamento mais estreito para obter um satisfatório coeficiente de uniformidade.

3. Maiores velocidades do vento exigiram um menor espaçamento, a fim de assegurar um razoável coeficiente de uniformidade.

OLITTA (24) salienta que a combinação ideal entre a pressão e o diâmetro do bocal, para cada modelo de aspersor, resultará na distribuição correta da água, dentro de um tamanho adequado das gotas em relação ao tipo de solo, à planta e ao alcance do jato. Quando as gotas são maiores que 4 mm em diâmetro, tendem a prejudicar as folhas delicadas das plantas e a formar incrustações na superfície de solos argilosos. As gotas de diâmetro menor que 1 mm são facilmente levadas pelo vento, acarretando uma inadequada distribuição. O autor esclarece, finalmente, que os aspersores de tamanho médio, trabalhando à pressão cor

reta, devem produzir gotas na faixa de 1 a 4 mm de diâmetro.

HENDERSON (19) recomenda que o espaçamento dos aspersores ao longo da linha lateral deve estar compreendido entre $1/4$ e $1/2$ do diâmetro de cobertura do aspersor e que a distância entre as linhas laterais não deve exceder $2/3$ do diâmetro de cobertura.

Corry, citado por OLITTA (24), esclarece que o valor de coeficiente de uniformidade é o processo estatístico mais comum para avaliação de sistemas de irrigação por aspersão, sendo que, por convenção, o valor de 80% é o mínimo aceitável para um desempenho normal do aspersor.

A ASAE (1), por intermédio de seu comitê de Irrigação por Aspersão, apresentou uma série de recomendações (ASAE R 330) para uma realização correta do teste com o aspersor:

1. O aspersor deve ser localizado numa área com superfície descoberta ou cuja vegetação tenha uma altura menor que 8 cm. A declividade máxima é de 1% para aspersores com vazão menor que 2,2 l/s e de 2% para outros aspersores. O tubo de elevação do aspersor deve estar na vertical.

2. Os pluviômetros devem ser todos do mesmo tamanho e mesma seção, colocados em posição vertical e dentro de um plano horizontal para receber a precipitação, espaçados uniformemente, formando um quadrado em volta do aspersor.

3. Deve-se medir a pressão do aspersor com um tubo de Pitot, acoplado a um manômetro, colocado no bico principal. Esta pressão não deve variar mais do que 3% durante a realização do teste. A vazão do aspersor deve ser avaliada com uma precisão de mais ou menos 3%, por meio de medição volumétrica ou com hidrômetro. A velocidade de rotação do aspersor deve ser calculada nos 4 quadrantes. A altura de aplicação da água em cada pluviômetro deve ser medida com uma exatidão de mais ou menos 2% da altura média de aplicação da água e anotada numa planta indi-

cativa de sua posição em relação ao aspersor.

4. O teste deve prolongar-se, de preferência, por um período de 1 hora.

5. Deve-se medir a velocidade e direção do vento, bem como a temperatura e a umidade relativa do ar, durante a realização do teste.

BILANSKI e KIDDER (5), BRANSCHIED e HART (7) e PAIR (27) esclarecem que vários fatores influem na distribuição da água nos sistemas de irrigação por aspersão. Estes podem ser agrupados em fatores ligados ao aspersor, sistemas de distribuição, climáticos, manejo do sistema e aerodinâmicos. Os fatores relacionados com o aspersor incluem: tamanho do bocal, ângulo do jato, velocidade de rotação, marca e modelo, pressão no bocal, número e tipo de bocal. Os ligados ao sistema de distribuição são: espaçamento entre aspersores ao longo da lateral, espaçamento entre laterais, altura do aspersor acima do solo ou da cultura, estabilidade do tubo de elevação e variações na pressão do sistema. Os fatores climáticos incluem todas as condições ambientais. Destas, as mais importantes são a velocidade e a direção do vento. Podem-se citar outras, tais como a temperatura e a umidade relativa do ar. Os fatores de manejo do sistema englobam duração da operação, velocidade de movimentação do aspersor ou da lateral sobre o solo, alinhamento das laterais e alinhamento dos tubos de elevação com a vertical. Os fatores aerodinâmicos envolvem a interação das gotas de água dos aspersores adjacentes e as massas de ar colocadas em movimento pelos jatos de água dos aspersores. Estes últimos ainda não têm sido medidos, mas observações qualitativas indicam sua existência.

BITTINGER e LONGENBAUGH (6) analisaram os modelos de distribuição teórica da água de dois sistemas de irrigação por aspersão: o gigante e o pivô - central. Estudaram os perfis de distribuição triangular e elíptico para o aspersor gigante. Obtiveram a melhor uniformidade de distribuição com sobreposição dos jatos de água, quando o espaçamento entre os aspersores foi igual ao raio de aplicação para o perfil

triangular e igual a 1,4 vezes o raio de aplicação para o perfil elíptico. Concluíram que o perfil triangular forneceu melhor distribuição que o elíptico, para os melhores espaçamentos. Estes autores não consideraram o efeito do vento nas suas análises.

WILCOX e McDOUGALD (34) estudaram os fatores que influem na uniformidade de distribuição da água de aspersores de rotação. Determinaram se havia alguma forma de relação entre o tipo de curva de aplicação (perfil) e a uniformidade de distribuição, quando se fazia a sobreposição dos jatos de água. Selecionaram 8 diferentes tipos teóricos de curvas geométricas. Examinaram diferentes perfis de aplicação de testes realizados no campo, usando diferentes pressões e tamanho de bocais, e escolheram os que mais se aproximavam dos 8 selecionados. Calcularam a uniformidade de distribuição da água usando vários espaçamentos entre aspersores. Chegaram às seguintes conclusões:

1. O melhor tipo de curva de distribuição é a que apresenta um decréscimo uniforme na velocidade de aplicação da água, do aspersor para a extremidade da área molhada. As curvas irregulares devem prover uma distribuição de água mais uniforme somente para certos espaçamentos mas não podem ser dignas de confiança para uma boa representação.

2. A obtenção do melhor tipo de curva não garante por si só uma boa distribuição da água. O coeficiente de uniformidade e o "range coefficient" devem ser usados conjuntamente na avaliação da uniformidade de aplicação.

3. O espaçamento, com os aspersores dispostos na forma quadrada, não deve ser maior que 60% do diâmetro molhado, para obter razoável uniformidade de distribuição da água.

4. A disposição quadrada dos aspersores fornece uma distribuição média da água mais uniforme que a retangular, cobrindo a mesma área, e é mais indicada somente para uma condição de pouco ou nenhum vento.

5. Sob condições de vento, a melhor distribuição é obtida com disposição retangular, e o espaçamento entre os aspersores deve ser menor.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os trabalhos de campo do presente estudo foram conduzidos numa área plana, com solo coberto por grama batatais (Paspalum notatum Flugge), localizada próximo ao laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa - MG.

Os testes foram realizados com um aspersor, marca PERROT, fabricado pela ASBRASIL (2), modelo ZED - 30, com o ângulo do jato de água de 27 graus e diâmetro dos bocais de 6,0 x 7,5 mm.

A água fornecida ao aspersor foi bombeada da represa próxima ao laboratório de Hidráulica, por meio de uma eletrobomba, auto-escorvante, de 7,5 CV, marca DANCOR. A condução da água foi feita através de tubos de aço zincado de engate rápido, de 3 1/2" (88,9 mm) de diâmetro e 6 m de comprimento.

O aspersor foi instalado utilizando-se engate rápido com válvula automática tipo ERVA, marca PERROT, sobre tubos de elevação de 1" (25,4 mm) de diâmetro e alturas de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 m.

Para controle de pressão, durante a realização dos testes, usou-se um manômetro de Bourdon, marca DOX, graduado em kg/cm^2 (bar), colocado a 20 m da eletrobomba na tubulação de recalque. Ajustou-se a pressão desejada através de dois registros de gaveta. Um instalado na saída da bomba, de 3" (76,2 mm) de diâmetro, e outro colocado a 14 m do primeiro, de 2 1/2" (63,5 mm) de diâmetro.

O método utilizado para determinação da uniformidade de distribuição, citado por BRANSCHIED e HART (7), CHRISTIANSEN (8) e DAVIS (13), foi aquele que emprega o modelo de distribuição de água de um único aspersor operando isoladamente. Este modelo forneceu uma série de informações sobre a distribuição da água nas diversas condições em que o aspersor foi operado e, principalmente, sobre alguns dos fatores que afetaram a uniformidade de aplicação, tais como o efeito do vento, espaçamento dos aspersores, pressão de serviço, altura do tubo de elevação, além de outros. O método consistiu em operar o aspersor por um período, de preferência, de 1 hora (1). A precipitação foi medida em pluviômetros dispostos sobre o solo em forma de malha quadrada de 2 m de lado, exceto nos eixos norte-sul e leste-oeste, onde foram espaçados de 0,5m para obtenção do perfil de distribuição da água do aspersor. A Figura 2 é um esquema deste método no campo.

Como pluviômetros foram usadas latas de óleo lubrificante, de um litro, com bordas rebatidas. Estes foram colocados sobre ladrilhos previamente nivelados, para assegurar o nivelamento de suas seções de captação.

Mediu-se, a intervalos de 10 minutos, a velocidade média do vento e sua direção, para analisar a influência destes fatores meteorológicos sobre a distribuição da água. Para medição da velocidade do vento, usou-se um anemômetro marca TAYLOR - ROCHESTER, instalado a 2 m de altura em relação ao solo. A direção do vento foi determinada por meio de um catavento instalado à mesma altura, próximo ao anemômetro.

Obteve-se a temperatura e a umidade relativa do ar por meio de um termohigrógrafo, marca WILH. LAMBRECHT KG GOTTINGEN, que foi colocado no interior de um abrigo meteorológico, apenas para se ter um controle das condições do microclima durante a realização dos testes.

Determinou-se, para cada teste, a velocidade de rotação do aspersor, em número de rotações por minuto (rpm), com a seguinte equação:

$$V_r = 300 / T \quad (VI)$$

onde: V_r = velocidade de rotação (rpm),

T = tempo gasto para o aspersor completar 5 voltas (s).

Efetuarão-se 5 repetições para obter a velocidade média de rotação do aspersor.

Foram também determinadas as velocidades setoriais de rotação do aspersor nos 8 setores de 45 graus descritos pelo aspersor em cada volta completa. Para isso, usou-se a seguinte equação:

$$V_s = 7,5 / t \quad (VII)$$

onde: V_s = velocidade de rotação setorial (rpm),

t = tempo gasto para o aspersor percorrer cada setor (s).

Realizaram-se 5 repetições, para obter um \bar{t} médio e consequentemente um valor médio para V_s .

Usaram-se 576 pluviômetros para coletar a água emitida pelo aspersor, distribuídos conforme ilustra a Figura 2. A água em cada pluviômetro foi medida com o auxílio de 4 provetas de 100 ml, com precisão de 1 ml.

A pressão de serviço para cada ensaio foi determinada no bocal ejetor do aspersor, utilizando-se um manômetro marca DOX, graduado em kg/cm^2 (bar), com uma precisão de $0,1 \text{ kg/cm}^2$ (bar), acoplado a um tubo de Pitot. No presente trabalho usaram-se pressões de serviço entre 1,5 e 4,5 bares (Apêndice A) as quais foram ajustadas por meio do registro de gaveta mais afastado da bomba.

A vazão do aspersor, para cada teste, foi medida pelo processo direto, que consiste em usar um recipiente de volume conhecido e um cronômetro (1). Como recipiente, usou-se um balão de vidro, com gargalo de aproximadamente 10 cm de comprimento e um diâmetro de 4,4 cm. Este balão, completamente cheio, apresentou um volume de 38,33 litros.

Para medir o tempo gasto em completar este volume, utilizou-se um cronômetro com uma precisão de 0,1 segundo.

Na medição das vazões foram conectados aos bocais do aspersor pedaços de mangueira de diâmetro igual a 1" (25,4 mm) e de comprimentos de 1,5 e 3,0 m. Desta maneira, conseguiu-se desviar os jatos d'água de cada bocal para o interior do balão.

Efetuarão-se 5 repetições para determinar a vazão média de cada bocal. A vazão do aspersor foi dada pela soma das vazões de seus bocais.

Cada ensaio foi realizado na seguinte rotina:

- a) Colocação da seção de captação de todos os pluviômetros virada para baixo;
 - b) Colocação do sistema em funcionamento;
 - c) Ajustamento da pressão de serviço desejada, pela abertura e fechamento do menor registro, e determinação da pressão no manômetro de controle situado na linha de recalque a 20 m da bomba;
 - d) Determinação da vazão do aspersor;
 - e) Colocação dos pluviômetros em posição de trabalho, após o desligamento da bomba;
 - f) Início do teste, sistema novamente posto em funcionamento, inclusive o anemômetro e o termohigrógrafo;
 - g) Verificação da velocidade de rotação do aspersor, completa e setorial, com a ajuda de dois cronômetros;
 - h) Realização de leituras no anemômetro à intervalos de 10 minutos;
 - i) Desligamento da motobomba, depois de transcorrido o tempo mínimo necessário para realizar o ensaio;
 - j) Medição do conteúdo de cada pluviômetro com a utilização das provetas e anotações em fichas apropriadas, como ilustra o Apêndice E.
- Desenvolveu-se um programa de computador para efetuar os cálculos.

los relativos à superposição e à determinação da uniformidade de distribuição da água baseado em dados de precipitação do aspersor e na simulação de sistemas de irrigação por aspersão com vários espaçamentos.

Efetuuou-se a superposição dos dados de precipitação de um único aspersor para 10 diferentes combinações de espaçamentos. O modelo desenvolvido para fazer a superposição levou em consideração a água aplicada por 16 aspersores.

Com base nos dados dos pluviômetros, obtidos de um único aspersor, estabeleceu-se um sistema de eixos coordenados com o aspersor na origem, conforme ilustra a Figura 3.

Como unidade de medida das abscissas e das ordenadas adotou-se o número de pluviômetros compreendidos nas direções de X e Y, o qual foi estabelecido segundo as expressões:

$$INX = IDX / CQ \quad (VIII)$$

$$INY = IDY / CQ \quad (IX)$$

onde: INX = número de pluviômetros abrangidos pela distância IDX,
 INY = número de pluviômetros abrangidos pela distância IDY,
 IDX = espaçamento entre os aspersores ao longo da linha lateral,
 IDY = espaçamento entre linhas laterais,
 CQ = comprimento da quadrícula (CQ = 2 m).

Adotando um espaçamento de 12 x 18 m (IDX x IDY), tem-se:

$$INX = IDX / CQ = 12 / 2 = 6$$

$$INY = IDY / CQ = 18 / 2 = 9$$

Com isso, origina-se um sistema de eixos coordenados, conforme ilustra a Figura 4.

A contribuição dos diversos aspersores para determinado pluviô-

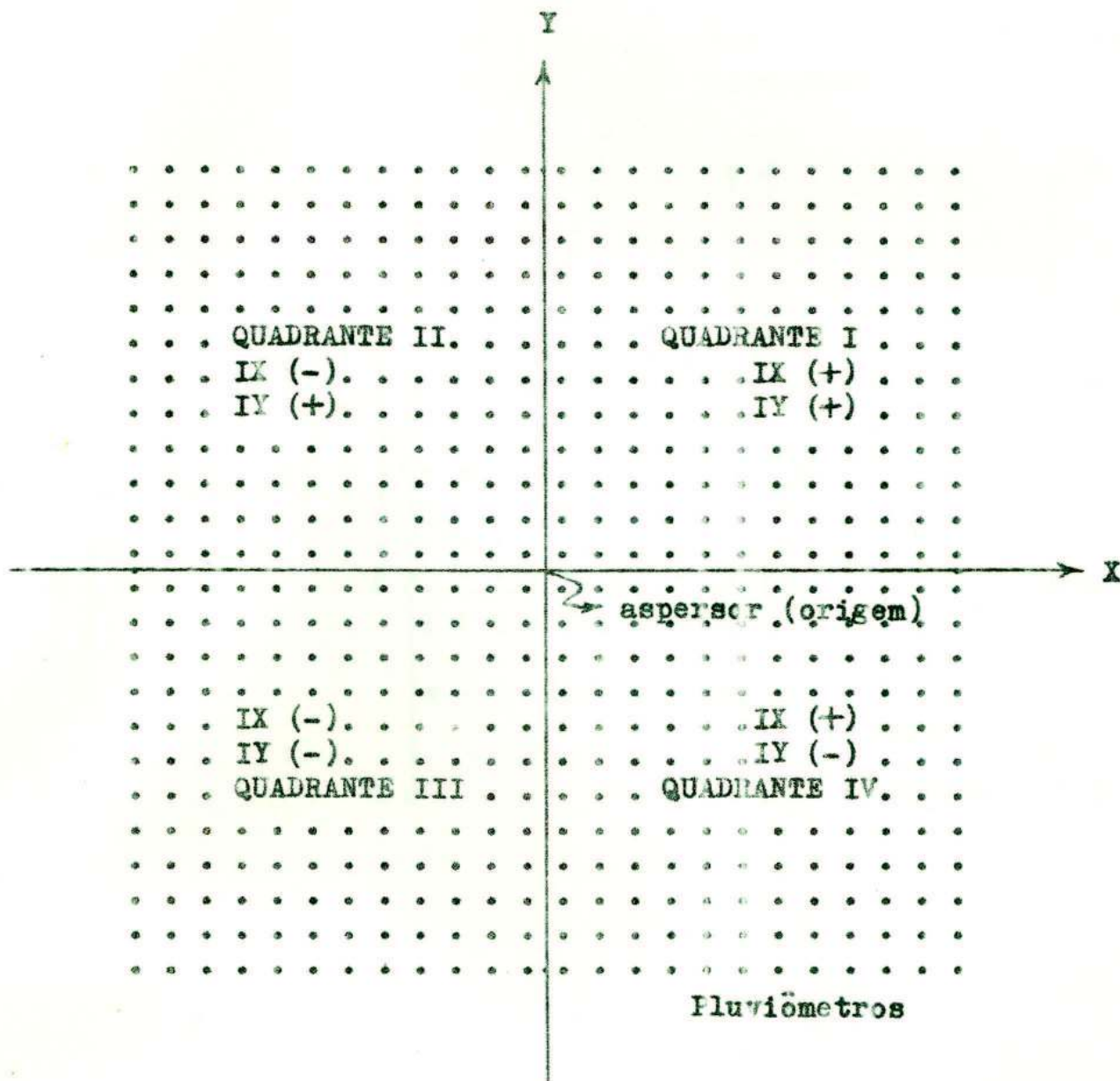


FIGURA 3 - Sistema de eixos coordenados estabelecidos. A origem, constituída pelo aspersor, tem coordenadas nulas (0,0). O eixo y ficou na direção norte-sul e o x na direção leste-oeste.

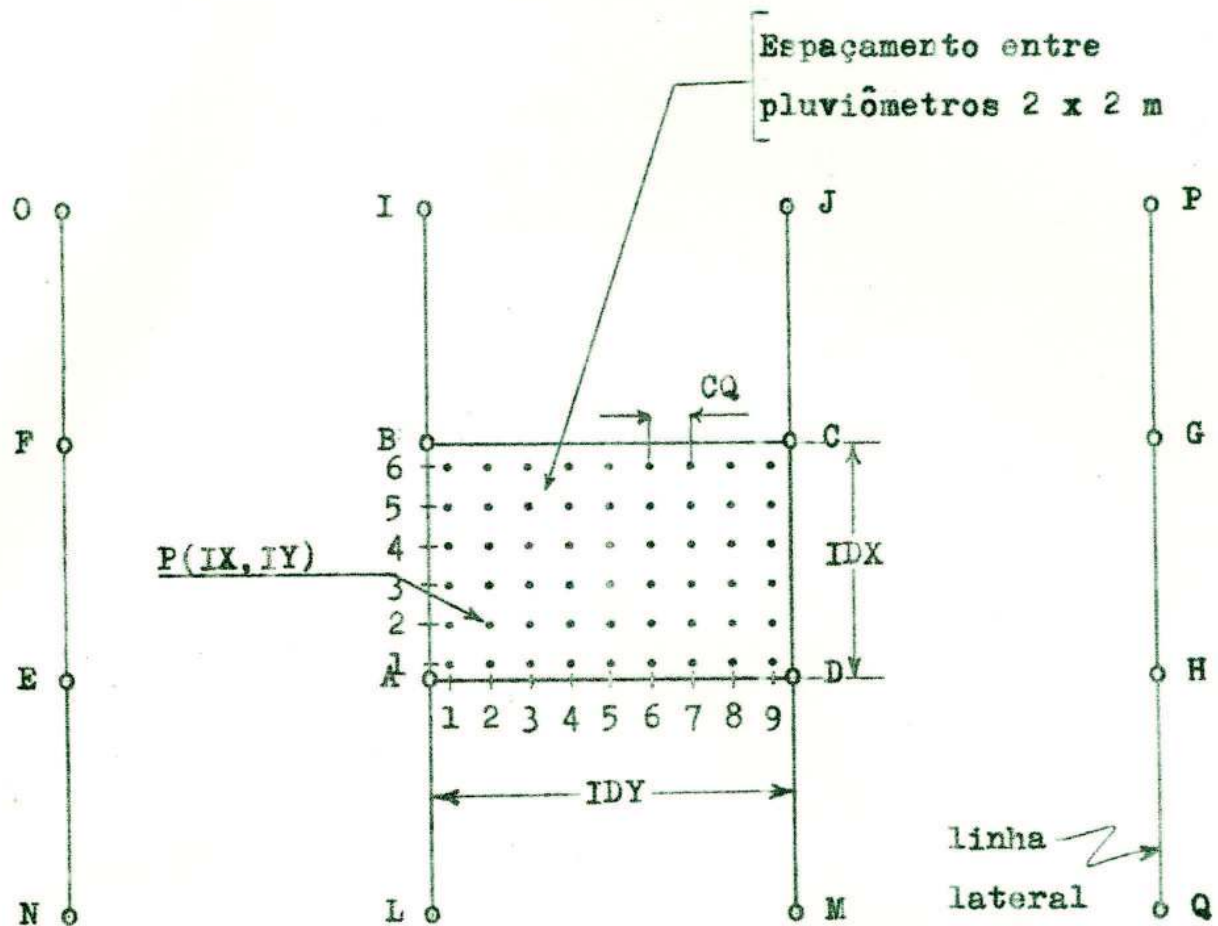


FIGURA 4 - Ilustração da unidade de medida das abscissas e das ordenadas. As letras A a Q representam os aspersores, $P(IX, IY)$ representa o pluviômetro de coordenadas IX e IY, IDY é o espaçamento entre linhas laterais, IDX é o espaçamento entre os aspersores ao longo da linha lateral e CQ é o comprimento da quadrícula.

metro P de coordenadas IX e IY, considerando um espaçamento de IDY x IDX, um número de pluviômetros de INY x INX, pode ser medida da seguinte forma:

$$QA = M(IX, IY)$$

$$QB = M(IX, IY - INX - 1)$$

$$QC = M(IX - INY - 1, IY - INX - 1)$$

$$QD = M(IX - INY - 1, IY)$$

$$QE = M(IX + INY, IY)$$

$$QF = M(IX + INY, IY - INX - 1)$$

$$QG = M(IX - 2 \times INY - 1, IY - INX - 1)$$

$$QH = M(IX - 2 \times INY - 1, IY)$$

$$QI = M(IX, IY - 2 \times INX - 1)$$

$$QJ = M(IX - INY - 1, IY - 2 \times INX - 1)$$

$$QL = M(IX, IY + INX)$$

$$QM = M(IX - INY - 1, IY + INX)$$

$$QN = M(IX + INY, IY + INX)$$

$$QO = M(IX + INY, IY - 2 \times INX - 1)$$

$$QP = M(IX - 2 \times INY - 1, IY - 2 \times INX - 1)$$

$$QQ = M(IX - 2 \times INY - 1, IY + INX)$$

onde: QA, QB, QC, QD, ..., QQ são as quantidades de água aplicada (M) pelos respectivos aspersores (A, B, C, D, ..., Q), em cm^3 . A Figura 5 ilustra como isto foi feito.

Fazendo $IX1 = IX - INY - 1$, $IX2 = IX + INY$, $IX3 = IX - 2 \times INY - 1$, $IY1 = IY - INX - 1$, $IY2 = IY + INX$, $IY3 = IY - 2 \times INX - 1$ e considerando que a soma das quantidades de água aplicada pelos 16 aspersores seja a quantidade total coletada pelo pluviômetro P, de coordenadas (IX, IY), chegou-se ao seguinte modelo, que foi usado para fazer a su-

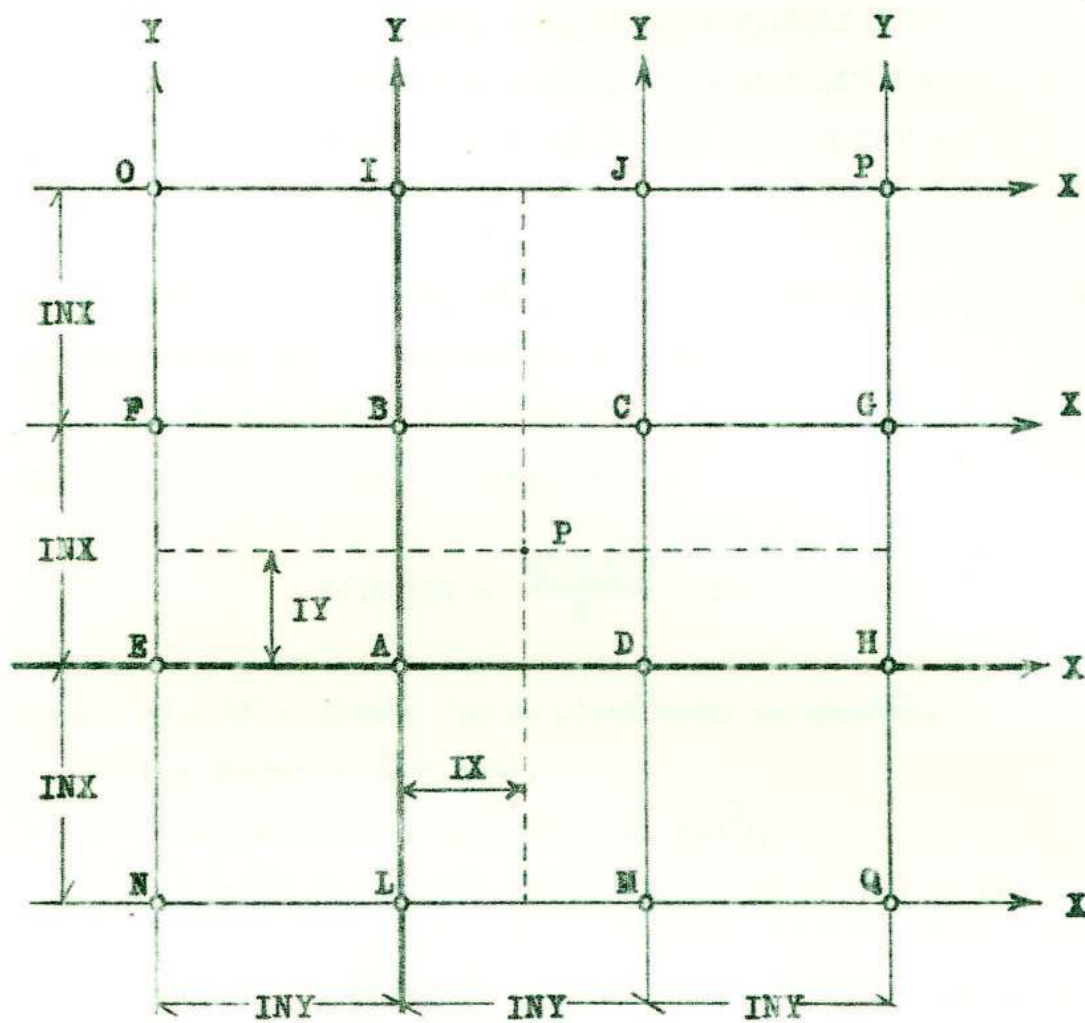


FIGURA 5 - Coordenadas do pluviômetro P em relação a cada um dos 16 aspersores que foram considerados para efetuar a superposição da água aplicada.

superposição:

$$T(IX,IY) = QA + QB + QC + QD + \dots + QQ \quad (X)$$

$$\begin{aligned} T(IX,IY) = & M(IX,IY) + M(IX,IY1) + M(IX1,IY1) + \\ & M(IX1,IY) + M(IX2,IY) + M(IX2,IY1) + \\ & M(IX3,IY1) + M(IX3,IY) + M(IX,IY3) + \\ & M(IX1,IY3) + M(IX,IY2) + M(IX1,IY2) + \\ & M(IX2,IY2) + M(IX2,IY3) + M(IX3,IY3) + \\ & M(IX3,IY2). \end{aligned} \quad (XI)$$

onde $T(IX,IY)$ é a quantidade total de água aplicada pelos 16 aspersores no pluviômetro de coordenadas IX e IY;

Transformaram-se as quantidades de água coletadas pelos pluviômetros em lâmina, usando a equação:

$$L(IX,IY) = \frac{M(IX,IY)}{S} \times 10 \quad (XII)$$

onde IX e IY = coordenadas do pluviômetro em questão,

L = lâmina de água (mm),

M = quantidade de água aplicada (cm³),

S = seção de captação do pluviômetro (S = 77,0 cm²).

Obteve-se a simulação dos sistemas de irrigação por aspersão como no exemplo que se segue.

Considerando as quantidades de água (M em cm³) coletadas pelos pluviômetros do teste representado no Apêndice E, o espaçamento de 12 x 12 m e o modelo matemático (XI), obteve-se a superposição, conforme mostra o Quadro 4, da seguinte maneira:

QUADRO 4 - Superposição das quantidades de água coletadas pelos pluviômetros, empregando o modelo matemático (XI) e considerando um sistema de irrigação por aspersão com espaçamento de 12 x 12 m. Os valores de precipitação obtidos estão em milímetros.

39,09	45,45	45,06	44,68	41,95	39,35
44,29	44,42	38,96	41,43	43,38	43,12
45,32	41,17	41,95	41,43	40,52	45,84
45,32	39,48	42,86	41,43	40,26	45,32
44,68	42,99	41,17	42,47	44,16	44,68
40,13	45,32	45,58	45,19	44,81	38,44

$$\begin{aligned}
 T(1,1) = & M(1,1) + M(1, -6) + M(-6, -6) + M(-6, 1) + \\
 & M(7,1) + M(7, -6) + M(-12, -6) + M(-12, 1) + \\
 & M(1, -12) + M(-6, -12) + M(1, 7) + M(-6, 7) + \\
 & M(7, 7) + M(7, -12) + M(-12, -12) + \\
 & M(-12, 7) ;
 \end{aligned}$$

ou

$$T(1,1) = 40,13 \text{ mm}$$

$$T(1,2) = 45,32 \text{ mm}$$

$$T(1,3) = 45,58 \text{ mm} \dots$$

$$T(6,6) = 39,35 \text{ mm}$$

Para determinação da uniformidade de distribuição da água foram usadas as seguintes equações (4, 7, 8, 13, 17, 18, 27, 29):

- Coeficiente de uniformidade de Christiansen (I)
- Coeficiente estatístico de uniformidade (II)
- "Pattern efficiency" (III)

- Novo coeficiente de distribuição (IV)
- Coeficiente de variação (V)

O programa foi desenvolvido na linguagem PL/I e rodado no computador IBM 360/40 da U.F.V.

A Figura 6 mostra o fluxograma do programa desenvolvido.

Usando os dados de precipitação do aspersor e as 10 diferentes combinações de espaçamentos, obteve-se a superposição e os coeficientes de uniformidade de Christiansen, empregando o programa desenvolvido. Um total de 760 observações, obtidas no campo, foram utilizadas no desenvolvimento de uma equação de regressão múltipla para determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função da altura do tubo de elevação, da pressão de serviço, da velocidade do vento, do espaçamento entre aspersores ao longo da lateral e do espaçamento entre linhas laterais.

Analisaram-se também os efeitos da altura do tubo de elevação, da pressão de serviço, da velocidade do vento, do espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral e do espaçamento entre linhas laterais sobre o coeficiente de uniformidade de Christiansen, por meio da equação de regressão estabelecida.

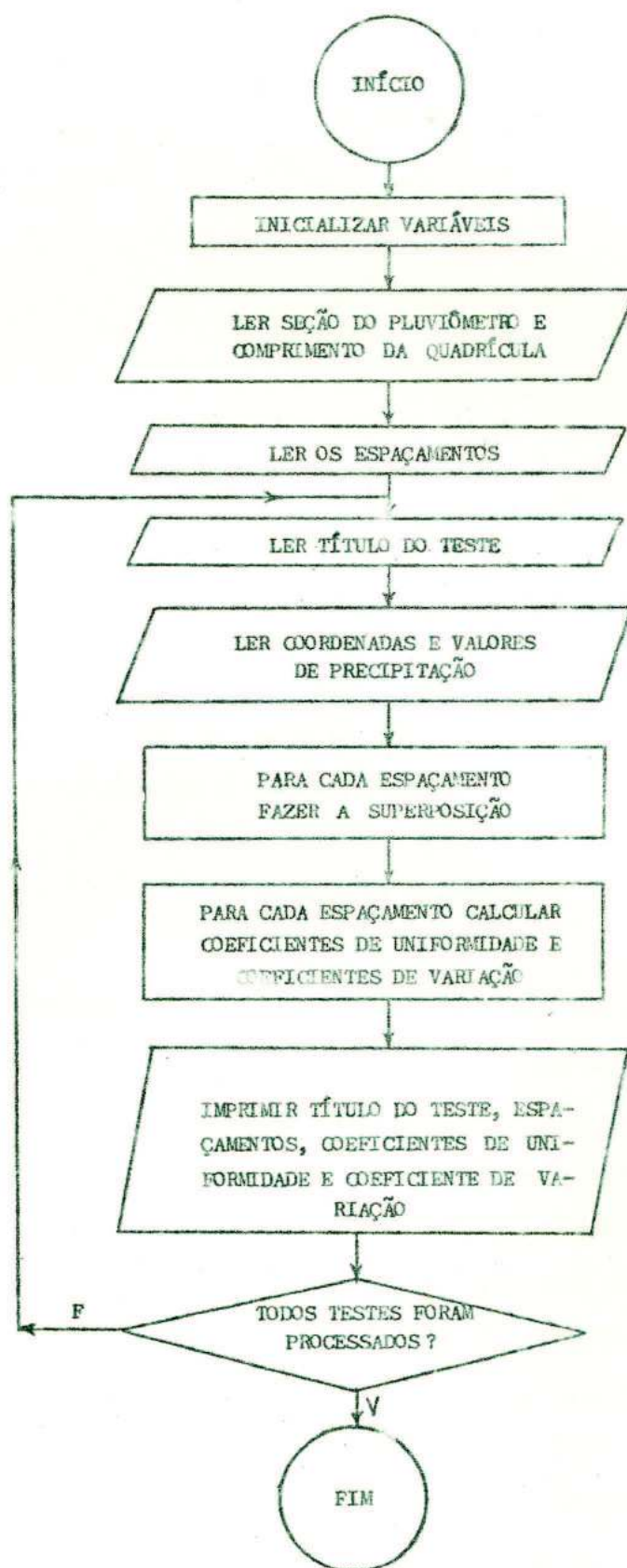


FIGURA 6 - Fluxograma do programa usado para fazer a superposição da lâmina d'água e calcular os coeficientes de uniformidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De posse dos dados de precipitação do aspersor e dos espaçamentos usados, determinou-se a superposição, os coeficientes de uniformidade e o coeficiente de variação usados neste trabalho, empregando o programa desenvolvido. O Quadro 5 mostra a saída do programa.

4.1. Modelo Matemático

Há diversos fatores que podem ser tomados como variáveis e que alteram a uniformidade de distribuição da água no sistema de irrigação por aspersão. Entretanto, os principais fatores são: espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral, espaçamento entre linhas laterais, pressão no bocal do aspersor, velocidade do vento e altura do tubo de elevação. A combinação destes fatores é que vai definir, em maior escala, o valor do coeficiente de uniformidade obtido.

Os dados de 76 testes realizados no campo foram usados no desenvolvimento da equação, para determinar o coeficiente de uniformidade de Christiansen. Escolheu-se este coeficiente pelo fato de ser o mais empregado na aspersão. Nestes testes, usaram-se 10 diferentes espaçamentos, a pressão no bocal do aspersor variou de 1,5 a 4,5 bares, a velocidade média do vento variou de 0 a 4 m/s e a altura do tubo de eleva-

QUADRO 5 - Saída do programa

Teste 2 - Pressão 2,1 atm - Tubo Elev. 0,5 m - Veloc. Vento 0,11 m/s
(1)

EL(2)	EA(3)	CEU(4)	CUC(5)	NCU(6)	PEF(7)	CV(8)
12	12	94,65	95,33	87,18	92,73	5,35
18	12	83,30	85,87	64,85	78,18	16,70
18	18	77,91	82,39	54,69	71,00	22,09
24	12	90,98	92,80	79,58	88,15	9,02
24	18	80,02	84,07	59,41	75,01	19,98
24	24	76,76	81,37	52,85	68,77	23,24
30	12	68,19	71,34	39,63	54,88	31,81
30	18	61,34	67,63	34,55	52,08	38,66
30	24	61,14	68,47	32,91	50,68	38,86
30	30	52,61	63,60	19,63	34,98	47,39

(1) Título do teste.

(2) Espaçamento entre linhas laterais (m).

(3) Espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral (m).

(4) Coeficiente estatístico de uniformidade (%).

(5) Coeficiente de uniformidade de Christiansen (%).

(6) Novo coeficiente de uniformidade (%).

(7) "Pattern efficiency" (%).

(8) Coeficiente de variação (%).

ção de 0,5 a 2,0 m (Apêndice A).

Usando os valores das variáveis mencionadas anteriormente, esta
beleceu-se, por meio de análise de regressão, a equação:

$$\begin{aligned}
 CUC = & 55,207 + 3,195 EL + 1,614 EA + 5,918 VEV + \\
 & + 2,204 ATU - 0,103 EL^2 - 0,048 EA^2 + 0,253 VEV^2 - \\
 & - 0,352 EL \times VEV - 0,221 EA \times VEV
 \end{aligned}$$

onde: CUC = coeficiente de uniformidade de Christiansen ($\%$),
 EL = espaçamento entre linhas laterais (m),
 EA = espaçamento entre aspersores ao longo da linha lateral (m),
 VEV = velocidade média do vento a 2 m de altura (m/s),
 ATU = altura do tubo de elevação (m).

Os valores dos coeficientes da equação desenvolvida foram encontrados com o uso do computador, na análise de regressão, usando 760 observações das variáveis obtidas no campo. Obteve-se um coeficiente de determinação de 0,96.

Os resultados das análises feitas para os testes de parâmetros e para a variância da regressão são apresentados nos Quadros 6 e 7.

Feita a análise de testes de parâmetros (Quadro 6) dos dados em questão, verificou-se que todos os coeficientes foram significativos, ao nível de 1% de probabilidade. Observa-se que somente foram significativas, ao nível de 1% de probabilidade, as interações entre os espaçamentos e a velocidade do vento.

A pressão no bocal do aspersor foi suprimida da equação porque não foi significativa para a faixa de variação usada nos testes, influenciando muito pouco o coeficiente.

O valor encontrado para F na análise de variância da regressão foi significativo, ao nível de 1% de probabilidade (Quadro 7).

QUADRO 6 - Resultados da análise dos parâmetros

Variável Independente	Média	Desvio-padrão	B	S(B)	T
EL	24,000	6,004	3,195	0,1732	18,442 **
EA	18,000	6,004	1,614	0,1559	10,354 **
VEV	1,769	0,995	5,918	0,6331	9,347 **
ATU	1,210	0,564	2,204	0,2110	10,445 **
EL ²	612,000	268,612	- 0,103	0,0037	- 27,416 **
EA ²	360,000	240,038	- 0,048	0,0037	- 12,946 **
VEV ²	4,120	3,869	0,253	0,1036	2,440 **
EL x VEV	42,465	26,818	- 0,352	0,0226	- 15,544 **
EA x VEV	31,848	21,668	- 0,221	0,0226	- 9,770 **
Interseção			55,207		
Variável Dependente					
CUC	72,513	16,854			
R ²	0,9638				

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

QUADRO 7 - Resultados da análise de variância da regressão

	G.L.	SQ	QM	F
Devido à regressão	9	207,801,00	23,089,0000	2.219,83 **
Indep. da regressão	750	7,800,94	10,4012	

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

4.2. Influência do Espaçamento

4.2.1. Sem Vento

Nas Figuras 7, 8, 9 e 10 vê-se a variação do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral e alturas do tubo de elevação, quando a velocidade do vento foi fixada em 0,0 m/c (nula).

Verifica-se que houve um aumento no coeficiente até o ponto em que o espaçamento entre linhas laterais assumiu o valor de 16 m, quando o coeficiente atinge seu valor máximo. Isto aconteceu para todas as curvas em que se fixou o espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral.

Nota-se que a equação de regressão ajustou-se bem para os valores de coeficiente de Christiansen, conforme indicam os pontos observados plotados.

As curvas de maior espaçamento entre aspersores ao longo da lateral apresentaram menores coeficientes, exceto a de 12 m, em que estes foram menores do que a de 18 m. Neste caso, o espaçamento de 12 m não foi adequado, podendo ter ocorrido superposições de segunda ou terceira ordem, o que possivelmente originou um perfil de distribuição final mais irregular do que aquele originado pelo espaçamento de 18 m.

Para quaisquer espaçamentos evidenciou-se que a maior altura do tubo de elevação do aspersor apresentou maiores valores de coeficiente.

O melhor coeficiente foi obtido com o espaçamento de 16 x 18 m. Como as linhas de irrigação têm um comprimento de 6m, o espaçamento deve assumir um valor que seja múltiplo deste número. No caso, 18 x 18 m seria o mais apropriado. Convém salientar, no entanto, que nem sempre o melhor espaçamento é o mais econômico. Pode ser que haja um maior espa

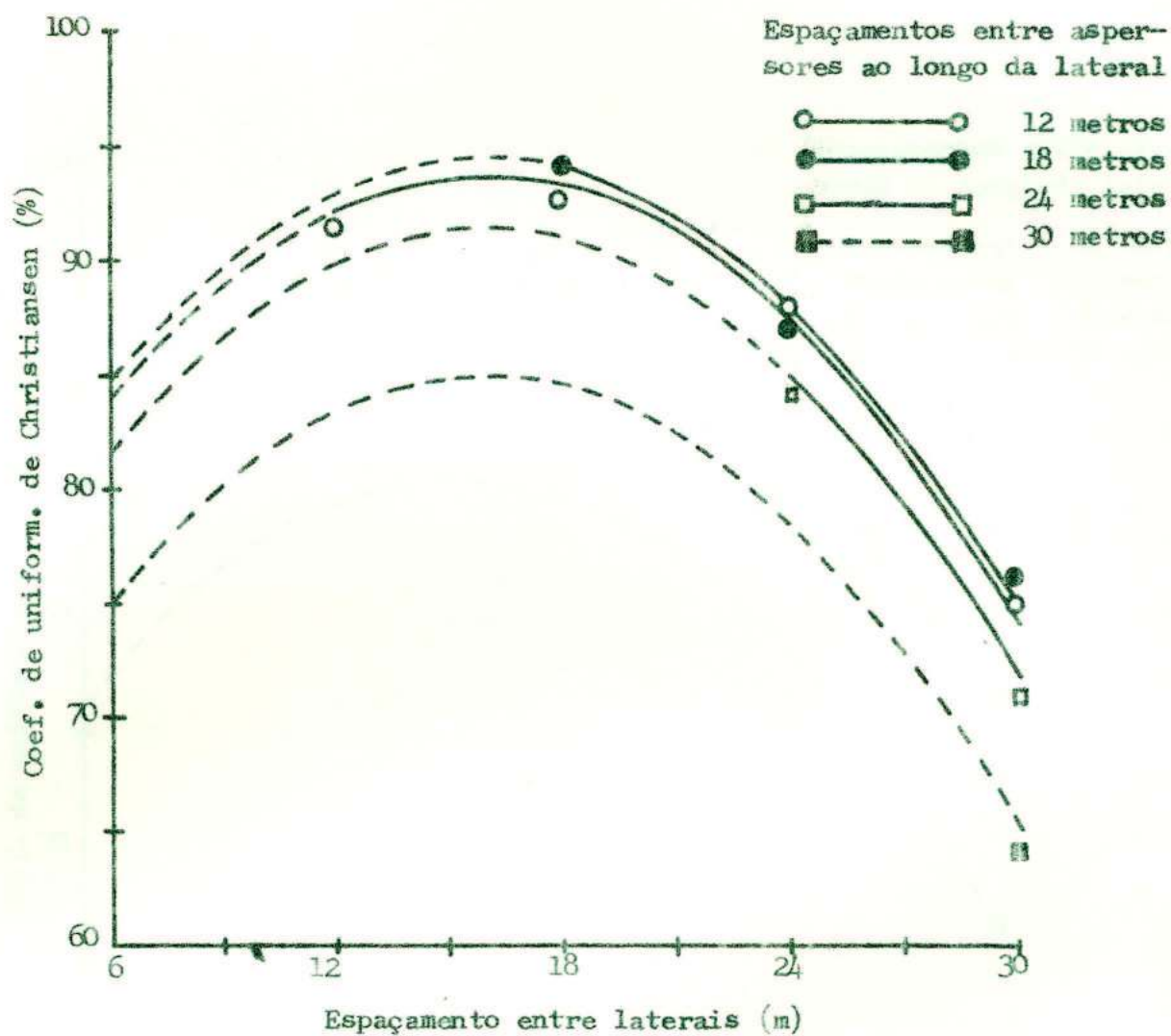


FIGURA 7 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura do tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 0 m/s.

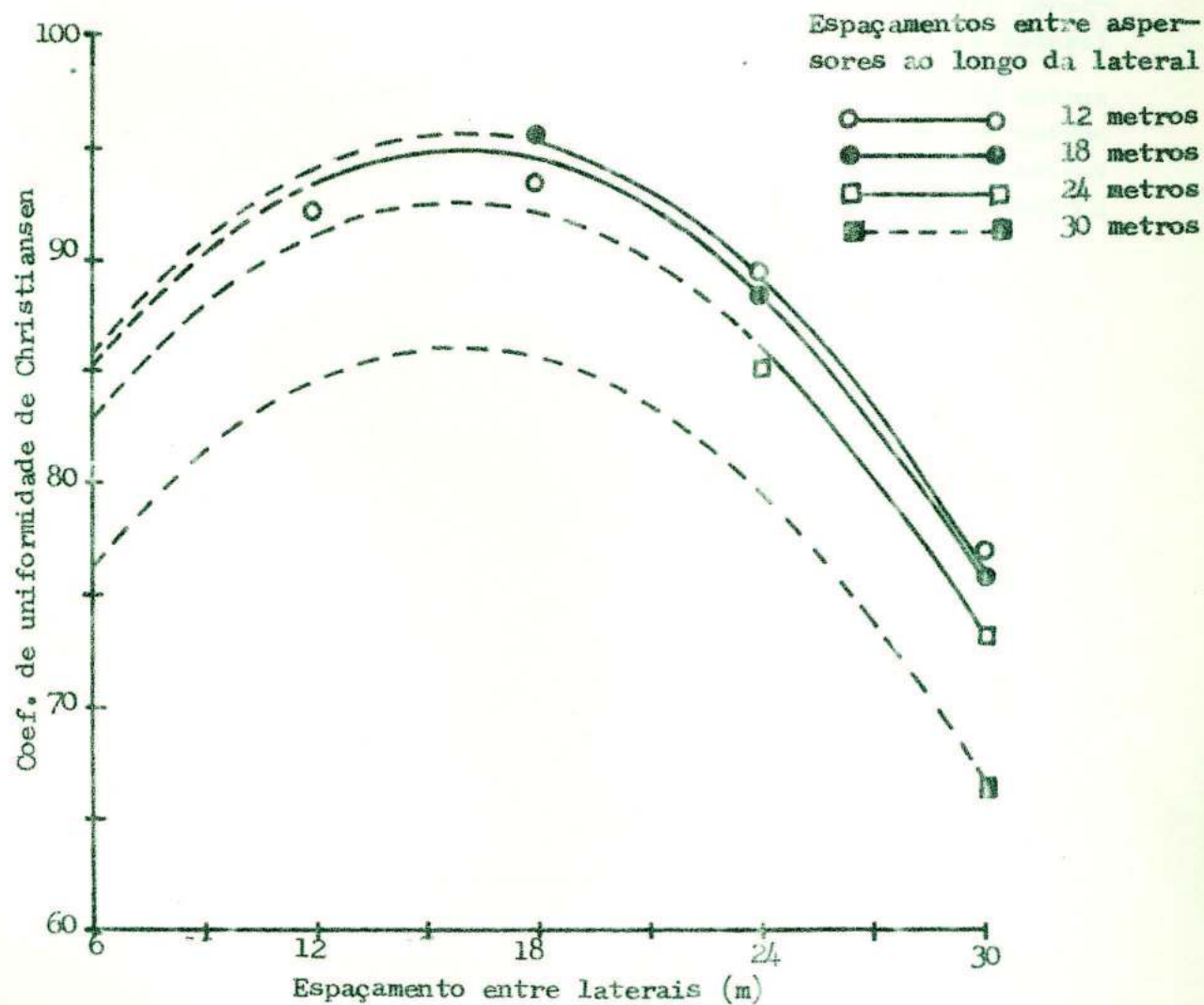


FIGURA 8 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 1,0 m e uma velocidade de vento de 0 m/s.

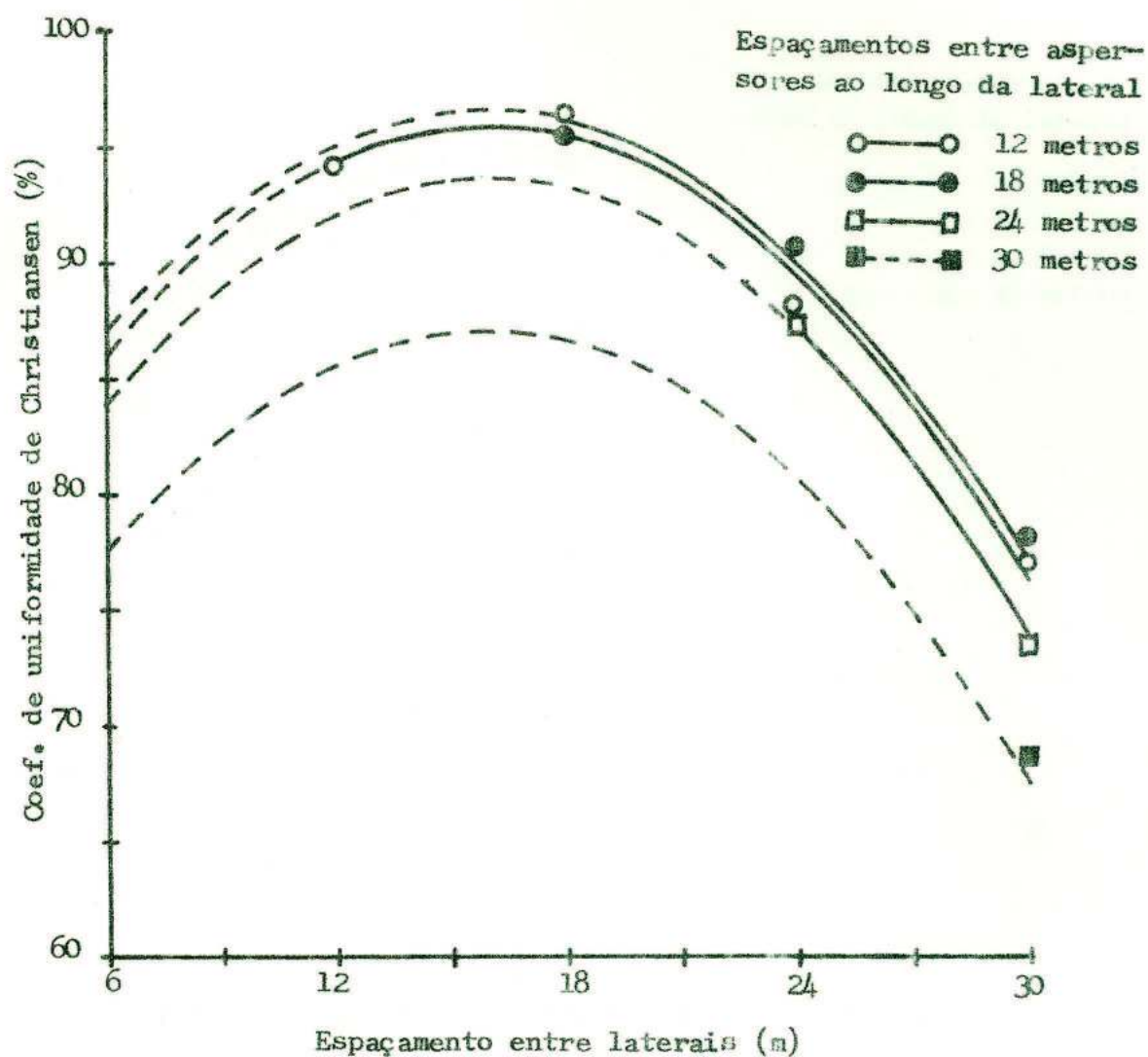


FIGURA 9 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 1,5 m e uma velocidade de vento de 0 m/s.

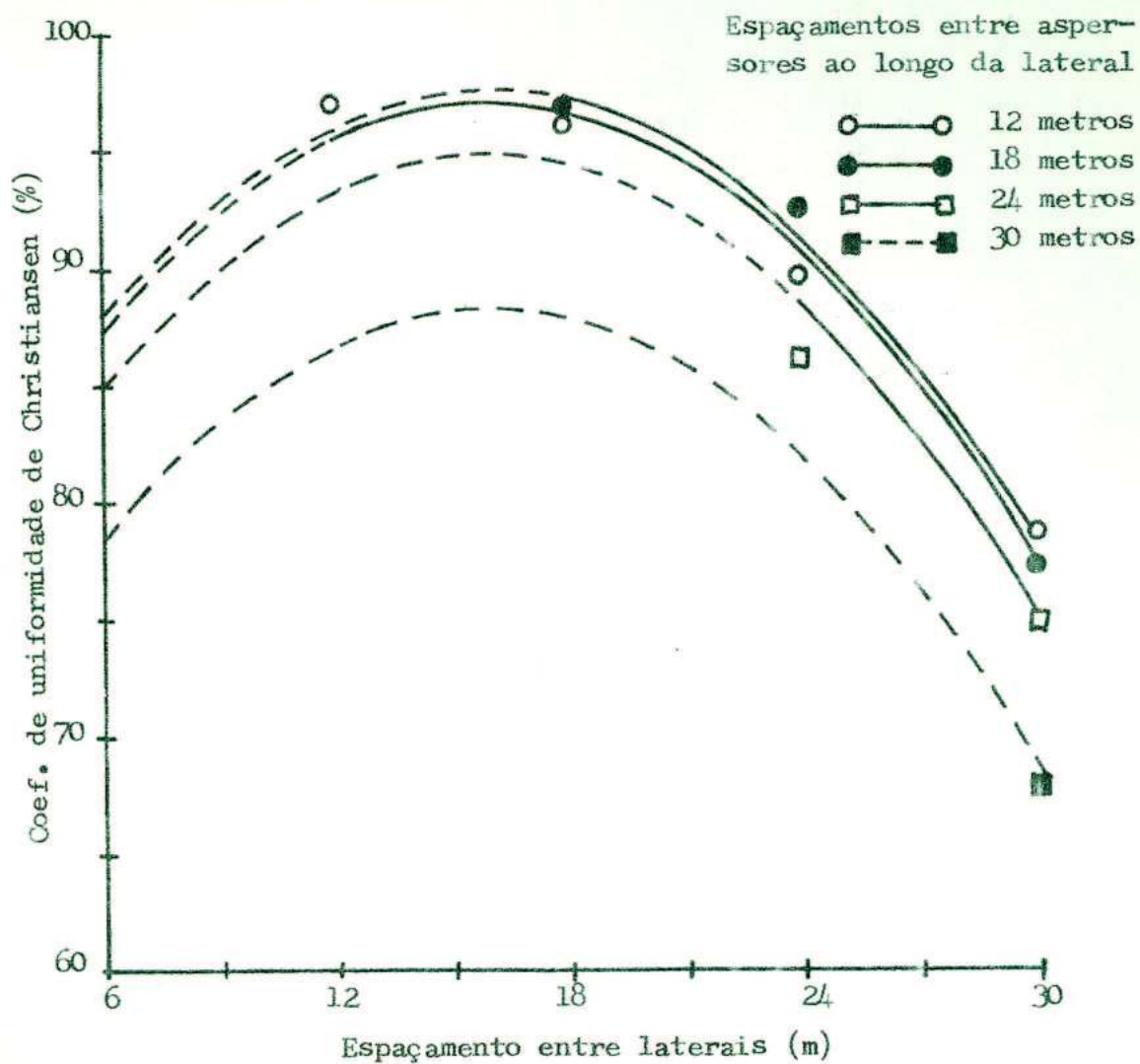


FIGURA 10 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 2,0 m e uma velocidade de vento de 0 m/s.

çamento que forneça um coeficiente aceitável, sendo bem mais conveniente, pois seriam gastos menos tubulações, registros, aspersores, válvulas, etc. Observando as Figuras 7, 8, 9 e 10, nota-se que o espaçamento de 24 x 24 m forneceu um coeficiente acima do mínimo recomendado (80%).

Tudo isto demonstra perfeitamente que há uma combinação ideal dos espaçamentos, para que haja uma superposição adequada, obtendo-se, desta maneira, um coeficiente satisfatório. Esta superposição está diretamente ligada aos espaçamentos entre os aspersores, ao longo e entre linhas laterais, e deve ocorrer nos dois sentidos.

A combinação entre os maiores espaçamentos forneceu menores valores de coeficiente, porque a superposição não foi adequada, ficando algumas partes da área irrigada com baixa ou nenhuma precipitação, originando um perfil de distribuição final bastante irregular. Isto foi constatado principalmente para os espaçamentos de 30x12, 30x18, 30x24 e 30x30 m.

4.2.2. Com Vento

Quando se consideraram velocidades de vento de 2 e 4 m/s (Figuras 11 e 12), notou-se que a melhor curva foi a que apresentou menor espaçamento entre aspersores ao longo da lateral e que o valor máximo de coeficiente foi obtido para um espaçamento de 13 m entre linhas laterais, para a velocidade de vento de 2 m/s, e de 9 m quando o vento foi de 4 m/s. Observou-se que o ponto de máximo da curva se desloca para a esquerda à medida que se aumenta a velocidade do vento. Neste caso, obtêm-se melhores coeficientes para as combinações entre os menores espaçamentos. Demonstra-se, com isto, que o vento influencia bastante o coeficiente, exigindo menores espaçamentos. O espaçamento mais indicado para se obter o coeficiente mais elevado é o de 12 x 12 m. Convém

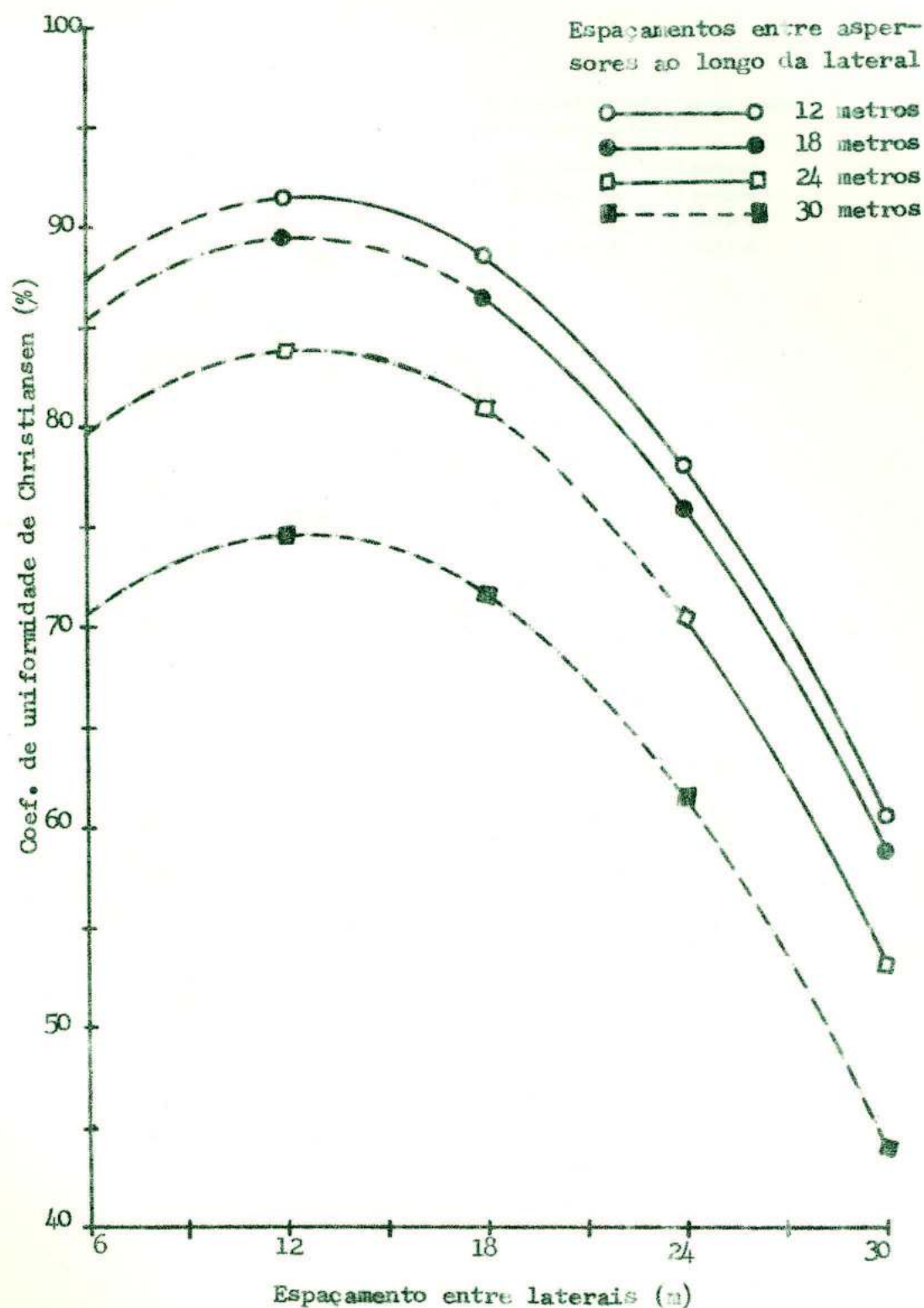


FIGURA 11 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 2 m/s.

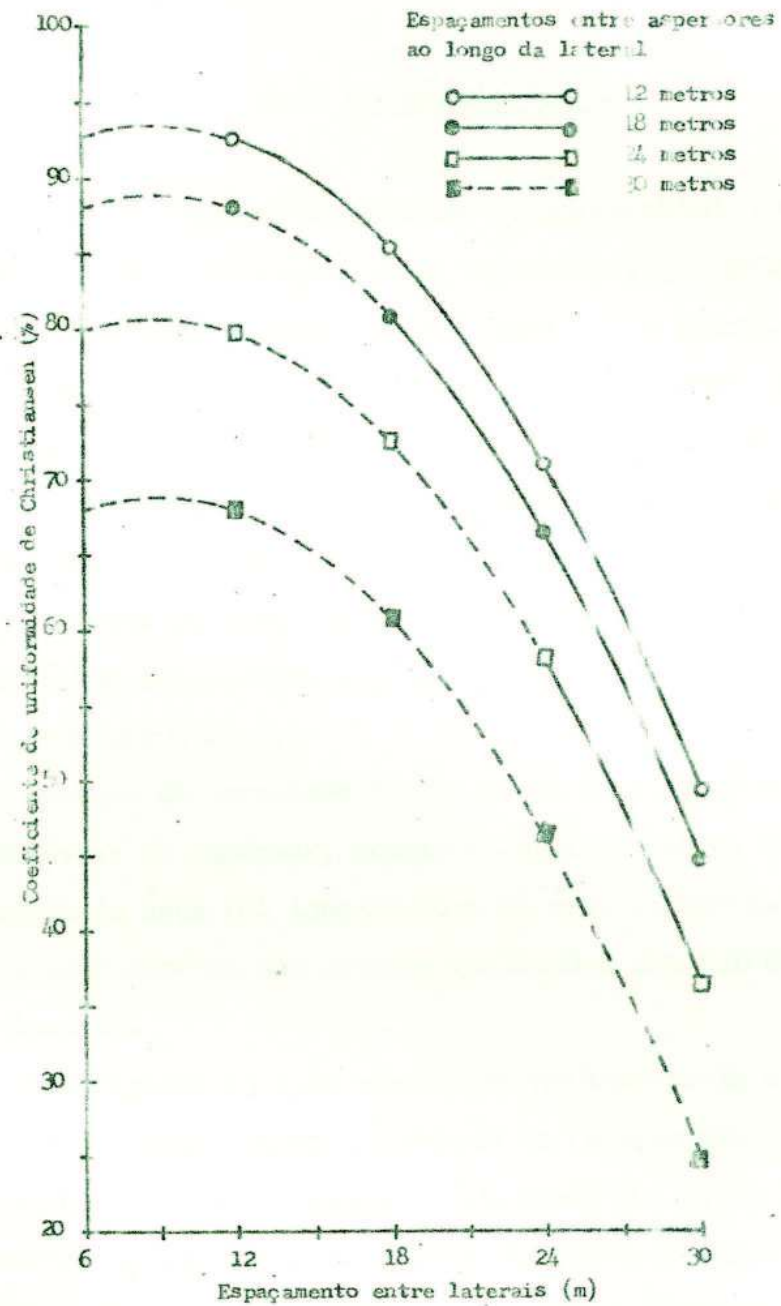


FIGURA 12 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e uma velocidade de vento de 4 m/s.

salientar que combinações entre maiores espaçamentos fornecem coeficientes aceitáveis e são bem mais econômicas.

4.3. Influência do Vento

O vento altera o coeficiente de uniformidade provocando distorção da distribuição da água pelos aspersores. A grandeza desta distorção está em função da velocidade do vento e do tamanho das gotas de água. Uma velocidade de vento mais elevada e um menor tamanho das gotas provoca uma maior distorção fornecendo menores valores de coeficiente. Ocorre uma alongação do modelo de distribuição da água no sentido da ação do vento e uma diminuição no sentido oposto.

O efeito do vento pode ser consideravelmente diminuído através da redução do espaçamento dos aspersores tanto ao longo das linhas laterais como entre elas.

Ocorreu um arrastamento das gotas muito pequenas a distâncias consideráveis do aspersor, graças à força do vento. Por isso, pequena quantidade de água foi lançada fora da área do teste. Esta água não foi medida. Isto ocorreu nos ensaios realizados com velocidades de vento mais elevadas.

Nas Figuras 13 e 14 vê-se o comportamento do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes velocidades de vento (0, 1, 2, 3, e 4 m/s), quando a altura do tubo de elevação foi de 0,5 m e o espaçamento entre os aspersores ao longo da lateral de 18 e 30 m. Nota-se que, para os espaçamentos entre laterais acima de 12 m, as mais elevadas velocidades de vento forneceram um menor coeficiente. Os maiores espaçamentos entre laterais forneceram um maior incremento de variação da curva quando se aumentou a velocidade do vento.

As curvas de velocidade do vento se aproximam mais para os meno

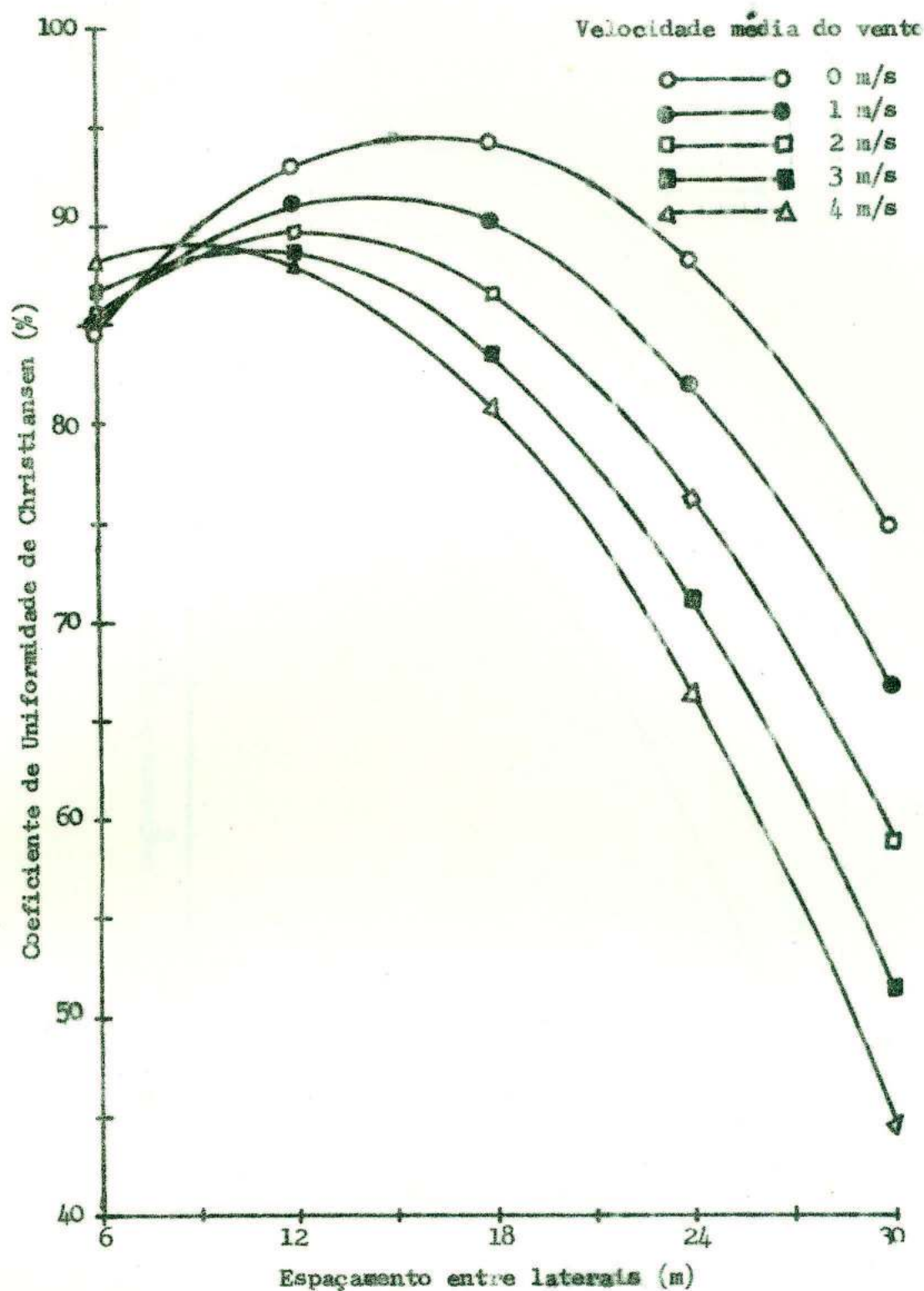


FIGURA 13 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes velocidades do vento, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m e um espaçamento entre aspersores ao longo da lateral de 18 m.

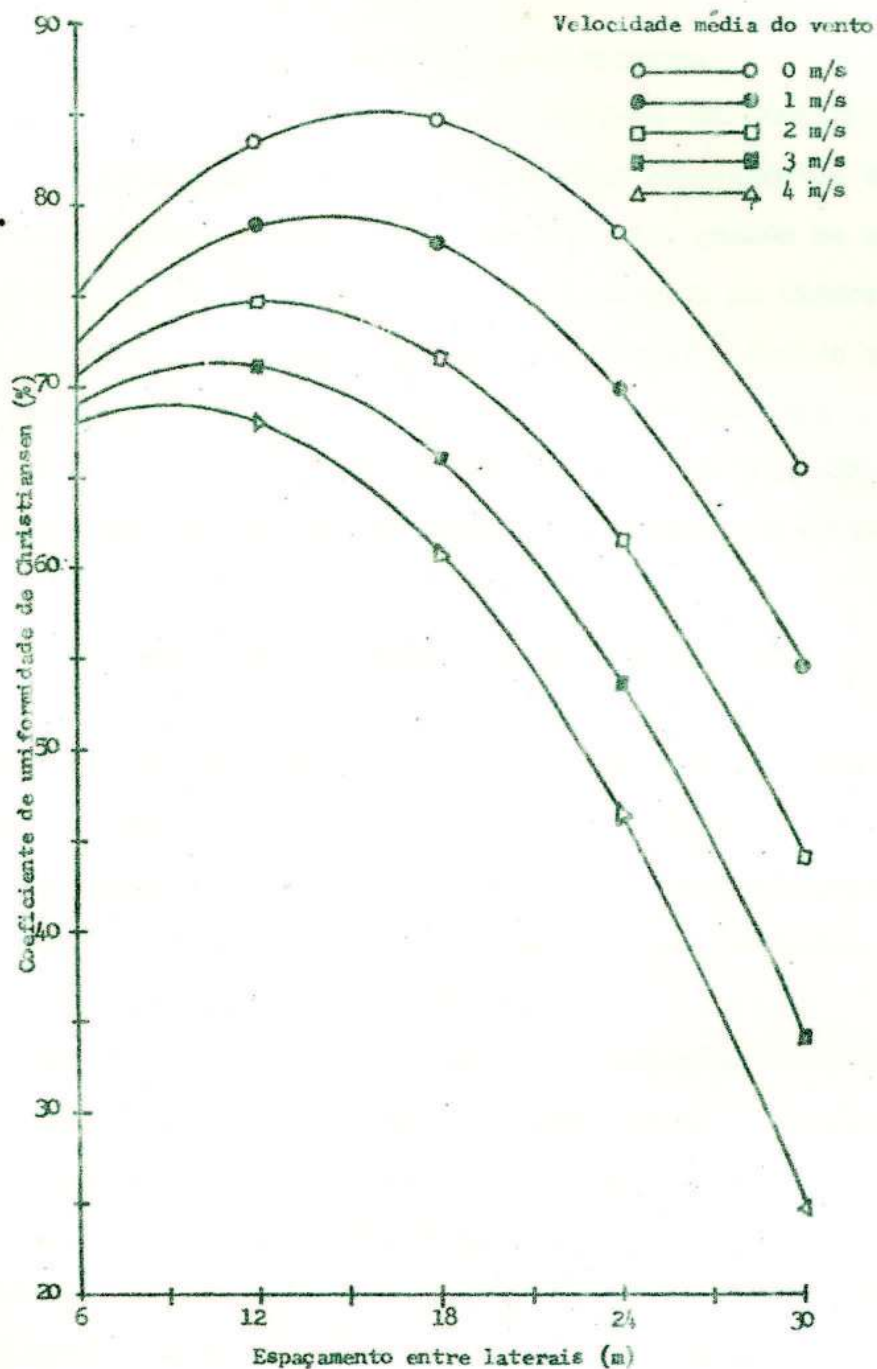


FIGURA 14 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função do espaçamento entre linhas laterais, para diferentes velocidades de vento, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5m e um espaçamento entre aspersores ao longo da lateral de 30 m.

res espaçamentos, fornecendo melhores coeficientes.

A variação do coeficiente de uniformidade de Christiansen, em função da velocidade do vento, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral e entre as laterais, quando se manteve uma altura de tubo de elevação de 0,5 m, é ilustrada na Figura 15. Verificou-se que ocorreu uma diminuição do coeficiente à medida que se aumentou a velocidade do vento. Esta diminuição foi bem mais acentuada para as maiores combinações de espaçamento. Isto explica por que se deve reduzir o espaçamento para as maiores velocidades de vento.

4.4. Influência da Altura do Tubo de Elevação

Os tubos de elevação prestam-se para eliminar ou para reduzir a turbulência da água, quando esta é derivada da linha de irrigação para o aspersor, assegurando uma operação mais uniforme e eficiente.

A escolha da altura do tubo de elevação mais adequada depende do tipo de cultura que vai ser irrigada.

O tubo de elevação deve ser colocado perpendicular à superfície do solo e bem acoplado à linha lateral, para evitar vibrações. Os de 1,5 e 2,0 m de altura foram sustentados por um tripé.

A Figura 16 ilustra a influência da altura do tubo de elevação no coeficiente de uniformidade de Christiansen, para diferentes velocidades de vento, quando se manteve um espaçamento de 18 x 18 m. Verifica-se que a elevação da altura do tubo promoveu aumento no coeficiente. O efeito linear observado para o tubo de elevação indica uma correção aditiva no coeficiente de 2,2% para cada metro de altura.

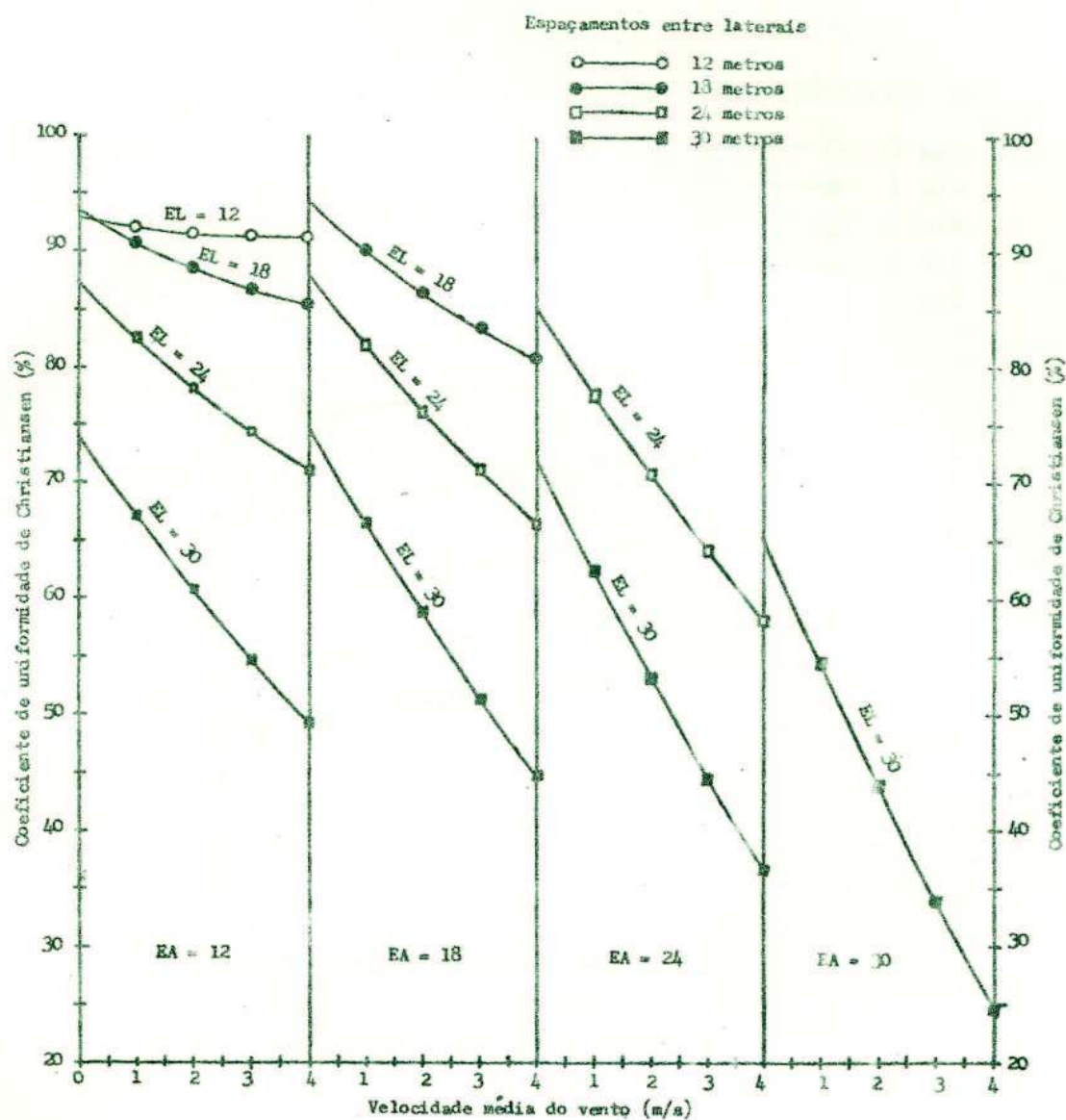


FIGURA 15 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen versus velocidade do vento, para diferentes espaçamentos entre aspersores ao longo da lateral (EA) e entre linhas laterais, considerando uma altura de tubo de elevação de 0,5 m.

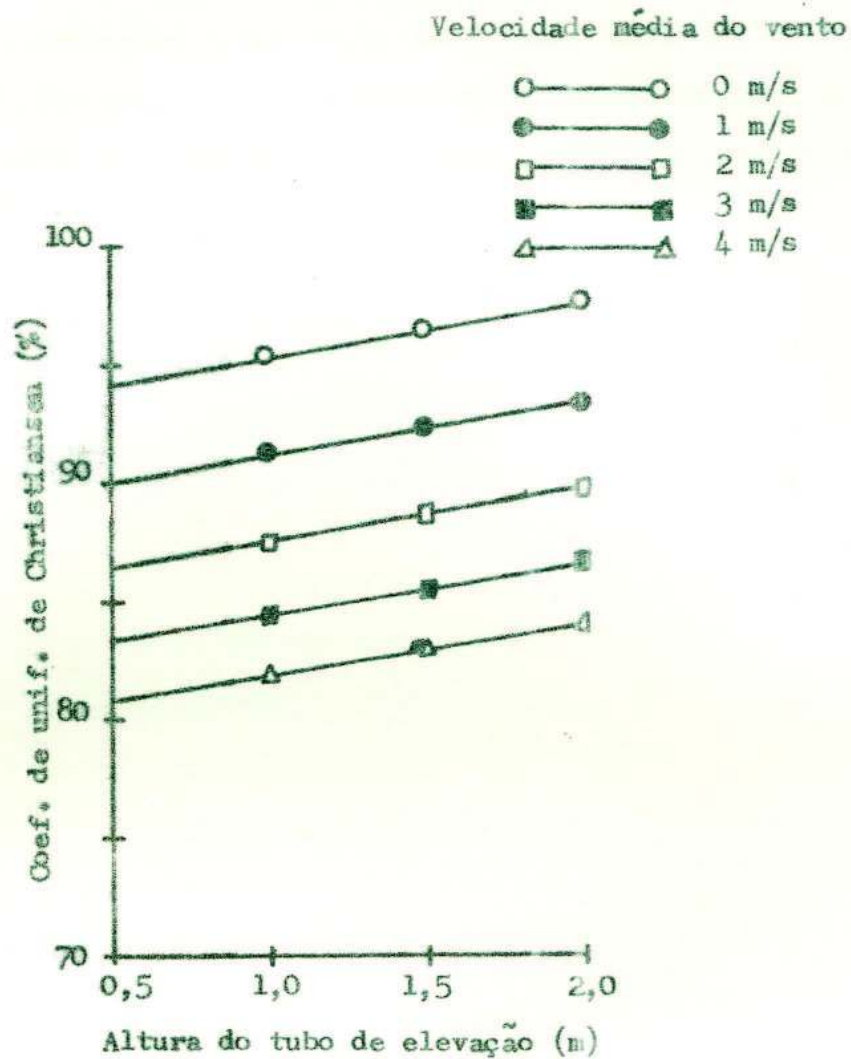


FIGURA 16 - Coeficiente de uniformidade de Christiansen versus altura do tubo de elevação, para diferentes velocidades de vento, considerando um espaçamento de 18 x 18 m.

4.5. Pressão no Bocal do Aspersor

O coeficiente de uniformidade de Christiansen não foi influenciado pela pressão para o intervalo de variação usado nos testes (1,5 a 4,5 bares). Provavelmente isto aconteceu em razão do fato de se ter trabalhado dentro dos limites recomendados para os aspersores comuns.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Os trabalhos de campo foram conduzidos em área plana, localizada próximo ao laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa - MG. Elaborou-se um programa de computador para calcular a uniformidade de distribuição da água na irrigação por aspersão, usando as seguintes expressões: coeficiente de uniformidade de Christiansen, "novo coeficiente" de uniformidade de Benami e Hore, "pattern efficiency" recomendado pela USDA, coeficiente estatístico de uniformidade de Wilcox e Swales e o coeficiente de variação.

Os cálculos basearam-se nos modelos de distribuição de água de um único aspersor, os quais foram obtidos de pluviômetros dispostos sobre a superfície do solo. Efetuou-se a superposição das lâminas de água, usando o programa, de acordo com a simulação de 10 diferentes combinações de espaçamentos entre os aspersores ao longo da lateral e entre as laterais.

O propósito principal deste trabalho foi desenvolver uma equação para estimar o coeficiente de uniformidade de Christiansen em função da altura do tubo de elevação do aspersor, do espaçamento entre aspersores ao longo da lateral, do espaçamento entre linhas laterais, da pressão no bocal do aspersor e da velocidade média do vento.

Os resultados encontrados, nas condições do experimento, permitiram as seguintes conclusões:

1. A equação de regressão estabelecida apresentou, na análise de regressão, um coeficiente de determinação de 0,96, sendo o seu emprego recomendado para condições iguais ou semelhantes às aquelas em que foram realizados os testes.

2. O melhor coeficiente, considerando nulo o efeito do vento foi obtido com o espaçamento de 18 x 18m, porém o de 24 x 24m forneceu um coeficiente acima de 80%.

3. O espaçamento deve ser reduzido à medida que se aumenta a velocidade do vento, a fim de assegurar um coeficiente aceitável.

4. Os espaçamentos de 12 x 12; 18 x 12 e 18 x 18 m forneceram um coeficiente acima de 80%, para velocidades de vento abaixo de 4 m/s.

5. Os espaçamentos de 30 x 12; 30 x 18; 30 x 24 e 30 x 30m não seriam indicados para nenhuma condição de velocidade de vento, pois originaram uma distribuição da água bastante irregular, fornecendo um coeficiente inaceitável.

6. Para obter um coeficiente acima de 80%, deve-se recomendar os seguintes espaçamentos, com as respectivas velocidades de vento:

Espaçamento (m x m)	Velocidade do Vento (m/s)
24 x 12	menor que 1,5
24 x 18	menor que 1,3
24 x 24	menor que 0,6

7. Maiores coeficientes de uniformidade foram obtidos quando se usaram tubos de elevação mais altos.

8. O coeficiente de uniformidade foi mais influenciado pelo vento, à medida que se aumentou a altura do tubo de elevação.

6. LITERATURA CITADA

1. ASAE. Procedure for sprinkler distribution testing for research purposes. Agricultural Engineers, Yearbook, 497-499, 1973.
2. ASPERSÃO NO BRASIL S.A. S. Bernardo do Campo, ASBRASIL, 1974. 2 p. (Folheto de dados técnicos de aspersores).
3. BARRETO, G.B. Irrigação - Princípios, Métodos e Prática. Campinas, São Paulo, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1974. 135 p.
4. BENAMI, A. e HORE, F.R. A New Irrigation-sprinkler Distribution Coefficient. Trans. of the ASAE, 7(2):157-158, 1964.
5. BILANSKI, W.K. e KIDDER, E.H. Factors that Affect the Distribution of Water from a Medium-pressure Rotary Irrigation Sprinkler. Trans. of the ASAE, 1(1):19-23, 28, 1958.
6. BITTINGER, W.W. e LONGENBAUGH, R.A. Theoretical Distribution of Water from a Moving Irrigation Sprinkler. Trans. of the ASAE, 5(1):26-30, 1962.
7. BRANSCHIED, V.O. e HART, W.E. Predicting Field Distributions of Sprinkler Systems. Trans. of the ASAE, 11(6):801-803, 808, 1968.
8. CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by Sprinkling. University of California, Berkely, 1942. 124 p. (Bull. n. 670).

9. CHRISTIANSEN, J.E. The Uniformity of Application of Water by Sprinkler Systems. Agricultural Engineering, 22(2):89-92, 1941.
10. CLARK, R.N. e FINLEY, W.W. Sprinkler Evaporation Losses in the Southern Plains. ASAE, Palmer House, Chicago, Illinois, 1975. 12 p. (Paper n. 75-2573).
11. CHU, S.T. e ALLRED, E.R. An Analytic Approach to Determine Irrigation Sprinkler Spacing. Trans. of the ASAE, 11(4):540-545, 1968.
12. DAKER, A. A Água na Agricultura - Irrigação e Drenagem. 3.^a ed. Rio de Janeiro, Editora Freitas Bastos S.A., 1970. 453 p.
13. DAVIS, J.R. Measuring Water Distribution from Sprinklers, Trans. of the ASAE, 9(1):94-97, 1966.
14. DYLLA, A.S. e SHULL, H. Sprinkler Irrigation Percolation Losses. ASAE, U.S.D.A., Chicago, Illinois, 1975. 8 p. (Paper n. 75-2572).
15. FERREIRA, E. Relações entre métodos para determinação da uniformidade de distribuição em irrigação por aspersão. Porto Alegre, U.F.R.G.S., 1976. 103 p. (Tese de M.S.).
16. FROST, K.R. Factors Affecting Evapotranspiration Losses During Sprinkling. Trans. of the ASAE, 6(4):282-283, 1963.
17. FRY, A.W. e GRAY, A.S. Sprinkler Irrigation Hand-book. 8 th ed. Rain Bird Sprinkler MFG, Corporation, Glendorra, California, 1969. 36 p.
18. HART, W.E. Overhead Irrigation Pattern Parameters. Agricultural Engineering, 42(7):354-355, 1961.
19. HENDERSON, D.W. Application of Irrigation Water. University of California, Davis, 1965. (Mimeografado).
20. HERMSMEIER, L.F. Sprinkler Water Distribution Testing in a Desert Environment. Trans. of the ASAE, 15(3):436-439, 1972.

21. KRAUS, J.H. Application Efficiency of Sprinkler Irrigation and its Effects of Microclimate. Trans. of the ASAE, 9(5):642-645, 1966.
22. LÓPEZ, J. Riego por Aspersión. Centro de Treinamento em Irrigação, Petrolina, Pernambuco, SUDENE, convênio MINTER-IIICA, julho, 1975.
23. NORUM, E.M. A Method of Evaluating Adequacy and Efficiency of Overhead Irrigation Systems. Trans. of the ASAE, 9(2):218-220, 1966.
24. OLITTA, A.F.L. Os métodos de irrigação. São Paulo, Livraria Nobel S.A., 1977. 267 p.
25. PAIR, C.H.; HINZ, W.W.; REID, C. e FROST, K.R. Sprinkler Irrigation. 3 th ed. Sprinkler Irrigation Association, Washington, D.C., 1969. 444 p.
26. PAIR, C.H. Sprinkler Irrigation. USDA, Soil and Water Conservation Research Division, Washington, 1970. 9 p. (Folheto n.º 476).
27. PAIR, C.H. Water Distribution under Sprinkler Irrigation. Trans. of the ASAE, 11(5):648-651, 1968.
28. SHEARER, M.N. e WOLFE, J.W. Performance of continuously moving field plot sprinkler. ASAE, Agricultural Engineering Department, University of California, Davis, 1975. 7 p. (Paper n.º 75-2057).
29. SHULL, H. e DYLLA, A.S. Traveling Gun Application Uniformity in High Winds. Trans. of the ASAE, 19(2):254-258, 1976.
30. SHULL, H. e DYLLA, A.A. Wind Effects on Water Application Patterns from a large, single nozzle Sprinkler. Trans. of the ASAE, 19(3):501-504, 1976.
31. SOLOMON, K. Traveling Sprinkler Variables Affecting Application Uniformity. ASAE, Agricultural Engineering Department, St. Joseph. 1971. (Paper n.º 71-758).

32. TIBAU, A.O. Técnicas modernas de irrigação. São Paulo, Livraria Nobel S.A., 1976. 227 p.
33. WIERSMA, J.L. Effect of Wind Variation on Water Distribution from rotating Sprinklers. South Dakota State University. Agr. Exp. Sta. Techn., may, 1955. (Bull n.º 17).
34. WILCOX, J.C. e McDOUGALD, J.M. Water Distribution Patterns from rotary sprinklers. Can. Jour. of Agr. Sc., 35(3):217-228, 1955.

APÊNDICE A

TABELA DOS DADOS COLETADOS EM CADA ENSAIO

Teste N.º	Pressão de Serviço (bar)	Vazão do Aspersor (l/s)	Velocida de Média Vento (m/s)	Velocida de Rota ção do Aspersor (rpm)	Altura do Tubo de Elevação (m)	Duração do Teste (min.)
1	1,8	1,42	1,90	1,62	0,5	90
2	2,1	1,55	0,11	1,55	0,5	70
3	1,6	1,39	1,46	1,32	0,5	80
4	2,4	1,65	0,36	1,44	0,5	50
5	1,5	1,36	2,46	1,19	0,5	70
6	2,7	1,77	1,87	1,63	0,5	60
7	3,0	1,84	1,91	1,60	0,5	60
8	3,0	1,84	0,18	1,61	0,5	60
9	2,6	1,68	3,47	1,63	0,5	60
10	3,4	1,96	2,75	1,77	0,5	60
11	3,2	1,87	2,07	1,51	0,5	60
12	3,2	1,87	2,58	1,53	0,5	60
13	3,7	2,02	4,19	1,51	0,5	60
14	4,1	2,12	2,18	1,45	0,5	60
15	4,0	2,10	0,37	1,47	0,5	60
16	4,0	2,10	3,11	1,46	0,5	60
17	4,5	2,24	2,87	1,62	0,5	60
18	3,8	2,04	2,06	1,49	0,5	60
19	2,0	1,52	0,15	1,38	0,5	50
20	2,0	1,52	3,19	1,37	0,5	60
21	4,3	2,18	2,64	1,33	0,5	60
22	1,4	1,34	2,22	1,23	1,0	60
23	1,7	1,45	0,31	1,18	1,0	60
24	1,9	1,51	1,72	1,42	1,0	60
25	2,2	1,62	2,53	1,38	1,0	60

Continua ...

Continuação ...

Teste N.º	Pressão de Serviço (bar)	Vazão do Aspersor (l/s)	Velocida de Média Vento (m/s)	Velocida de Rota ção do Aspersor (rpm)	Altura do Tubo de Elevação (m)	Duração do Teste (min.)
26	1,9	1,51	1,46	1,26	1,0	50
27	2,3	1,65	1,99	1,34	1,0	50
28	2,0	1,57	0,23	1,33	1,0	50
29	2,5	1,71	0,36	1,31	1,0	45
30	2,7	1,78	1,82	1,38	1,0	50
31	3,0	1,83	0,11	1,33	1,0	50
32	3,0	1,83	0,51	1,43	1,0	60
33	3,2	1,92	1,71	1,37	1,0	60
34	3,4	1,96	1,66	1,37	1,0	50
35	3,6	2,03	1,97	1,36	1,0	50
36	3,8	2,05	3,50	1,36	1,0	60
37	4,2	2,13	2,91	1,33	1,0	60
38	4,5	2,23	1,43	1,34	1,0	50
39	4,4	2,22	2,24	1,22	1,0	60
40	4,4	2,22	1,41	1,27	1,0	60
41	4,0	2,11	0,60	1,34	1,0	60
42	4,0	2,11	0,62	1,35	1,0	60
43	1,9	1,45	1,42	1,11	1,5	60
44	1,6	1,30	0,63	1,07	1,5	60
45	1,8	1,42	3,21	1,15	1,5	50
46	2,4	1,59	2,07	1,25	1,5	60
47	2,2	1,54	2,97	1,01	1,5	60
48	2,6	1,67	1,29	1,15	1,5	60
49	3,0	1,76	1,48	1,41	1,5	50
50	3,0	1,76	2,51	1,40	1,5	60

Continua ...

Continuação ...

Teste N.º	Pressão de Serviço (bar)	Vazão do Aspersor (l/s)	Velocida de Média do Vento (m/s)	Velocida de Rota- ção do Aspersor (rpm)	Altura do Tubo de Elevação (m)	Duração do Teste (min.)
51	3,0	1,76	1,38	1,37	1,5	50
52	3,2	1,91	3,01	1,25	1,5	60
53	3,4	1,98	1,57	1,19	1,5	60
54	3,6	2,02	1,77	1,24	1,5	60
55	3,8	2,05	1,46	1,28	1,5	60
56	4,2	2,14	3,18	1,31	1,5	50
57	4,4	2,22	1,34	1,34	1,5	60
58	4,0	2,11	0,94	1,33	1,5	60
59	4,0	2,11	0,45	1,40	1,5	60
60	1,5	1,32	1,49	0,85	2,0	60
61	1,7	1,40	0,90	0,98	2,0	60
62	2,2	1,57	1,74	1,23	2,0	60
63	2,4	1,64	0,86	1,29	2,0	60
64	2,6	1,71	1,47	1,29	2,0	60
65	2,0	1,53	2,01	1,18	2,0	60
66	2,0	1,53	1,17	1,19	2,0	60
67	2,8	1,78	0,81	1,28	2,0	60
68	3,2	1,90	2,89	1,33	2,0	60
69	3,4	1,97	3,98	1,42	2,0	60
70	3,6	2,03	1,94	1,29	2,0	60
71	3,0	1,81	0,36	1,32	2,0	60
72	3,0	1,81	2,26	1,32	2,0	60
73	3,8	2,05	3,05	1,38	2,0	60
74	4,0	2,11	1,70	1,18	2,0	60
75	4,0	2,11	0,56	1,28	2,0	50
76	4,2	2,14	2,68	1,26	2,0	60
77	4,4	2,22	1,26	1,39	2,0	60

APÊNDICE B

VELOCIDADE DE ROTAÇÃO SETORIAL DO ASPERSOR

Velocidade de Rotação do Aspensor, em Número de Rotações por Minuto (rpm), dentro de setores de 45 graus, a partir do norte magnético no sentido dextrógiro.

Teste N.º	Setores							
	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
1	1,47	1,43	1,44	1,33	1,24	1,25	1,23	1,32
2	1,57	1,69	1,61	1,59	1,62	1,50	1,58	1,52
3	1,31	1,27	1,24	1,18	1,20	1,34	1,30	1,27
4	1,38	1,50	1,43	1,58	1,50	1,46	1,49	1,48
5	1,10	1,23	1,11	1,14	1,19	1,20	1,09	1,15
6	1,50	1,56	1,53	1,61	1,52	1,71	1,65	1,65
7	1,43	1,53	1,49	1,48	1,42	1,50	1,49	1,45
8	1,43	1,45	1,45	1,53	1,51	1,54	1,51	1,47
9	1,67	1,64	1,56	1,68	1,68	1,63	1,70	1,68
10	1,43	1,39	1,43	1,41	1,45	1,43	1,52	1,52
11	1,47	1,45	1,49	1,49	1,42	1,53	1,48	1,50
12	1,51	1,53	1,48	1,48	1,41	1,51	1,51	1,50
13	1,32	1,38	1,46	1,35	1,43	1,35	1,48	1,47
14	1,27	1,24	1,33	1,34	1,31	1,36	1,43	1,47
15	1,48	1,45	1,44	1,48	1,44	1,41	1,43	1,47
16	1,43	1,44	1,42	1,45	1,42	1,36	1,37	1,38
17	1,56	1,56	1,54	1,52	1,33	1,34	1,45	1,54
18	1,37	1,46	1,45	1,51	1,47	1,45	1,32	1,33
19	1,29	1,29	1,42	1,36	1,31	1,37	1,40	1,36
20	1,26	1,43	1,44	1,47	1,37	1,35	1,38	1,42
21	1,50	1,40	1,35	1,37	1,39	1,41	1,48	1,49
22	1,26	1,36	1,21	1,26	1,27	1,30	1,23	1,27
23	1,30	1,25	1,29	1,30	1,37	1,23	1,11	1,22
24	1,36	1,49	1,45	1,39	1,49	1,52	1,36	1,47
25	1,30	1,34	1,30	1,38	1,38	1,37	1,40	1,41

continua ...

continuação ...

Teste N.º	Setores							
	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
26	1,20	1,30	1,23	1,36	1,23	1,30	1,16	1,26
27	1,36	1,39	1,29	1,37	1,47	1,43	1,34	1,43
28	1,25	1,36	1,25	1,43	1,38	1,44	1,31	1,31
29	1,25	1,33	1,26	1,28	1,37	1,41	1,34	1,37
30	1,37	1,45	1,35	1,37	1,49	1,44	1,31	1,43
31	1,38	1,39	1,29	1,33	1,42	1,47	1,31	1,42
32	1,41	1,32	1,47	1,53	1,48	1,53	1,54	1,40
33	1,14	1,26	1,22	1,23	1,23	1,27	1,21	1,21
34	1,39	1,33	1,40	1,45	1,30	1,34	1,35	1,25
35	1,43	1,47	1,39	1,50	1,47	1,40	1,37	1,35
36	1,36	1,37	1,31	1,28	1,32	1,29	1,34	1,38
37	1,50	1,47	1,40	1,48	1,48	1,50	1,39	1,44
38	1,62	1,63	1,51	1,47	1,52	1,46	1,28	1,27
39	1,23	1,23	1,25	1,21	1,26	1,23	1,21	1,20
40	1,26	1,27	1,21	1,27	1,27	1,24	1,27	1,26
41	1,48	1,51	1,45	1,44	1,47	1,47	1,46	1,44
42	1,36	1,41	1,39	1,34	1,37	1,39	1,36	1,31
43	1,16	1,19	1,21	1,21	1,23	1,22	1,16	1,18
44	1,05	1,05	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,05
45	1,13	1,09	1,12	1,16	1,12	1,10	1,08	1,12
46	1,23	1,24	1,20	1,19	1,22	1,24	1,21	1,21
47	0,95	0,94	0,94	0,96	0,95	0,94	0,94	0,95
48	1,09	1,04	1,06	1,09	1,14	1,14	1,12	1,14
49	1,35	1,35	1,38	1,34	1,46	1,37	1,36	1,43
50	1,30	1,33	1,28	1,34	1,38	1,31	1,31	1,47
51	1,26	1,27	1,27	1,37	1,35	1,30	1,27	1,34

continua ...

continuação ...

Teste N.º	Setores							
	0-45	45-90	90-135	135-180	180-225	225-270	270-315	315-360
52	1,22	1,19	1,26	1,18	1,21	1,17	1,22	1,25
53	1,28	1,18	1,31	1,21	1,27	1,30	1,30	1,25
54	1,41	1,43	1,36	1,38	1,47	1,34	1,38	1,28
55	1,19	1,20	1,13	1,20	1,28	1,16	1,18	1,28
56	1,15	1,22	1,23	1,24	1,23	1,17	1,19	1,30
57	1,21	1,26	1,22	1,29	1,28	1,23	1,24	1,28
58	1,27	1,27	1,23	1,31	1,28	1,24	1,26	1,28
59	1,42	1,32	1,25	1,43	1,42	1,25	1,36	1,37
60	0,74	0,84	0,87	0,86	0,83	0,75	0,74	0,82
61	0,86	0,87	0,88	0,88	0,91	1,00	0,96	0,90
62	1,07	1,10	1,24	1,28	1,34	1,29	1,35	1,31
63	1,25	1,20	1,18	1,17	1,28	1,32	1,35	1,21
64	1,41	1,32	1,30	1,32	1,28	1,36	1,34	1,32
65	1,22	1,20	1,19	1,24	1,20	1,20	1,22	1,19
66	1,17	1,22	1,14	1,19	1,15	1,08	1,18	1,20
67	1,22	1,21	1,19	1,21	1,23	1,19	1,22	1,32
68	1,33	1,36	1,34	1,33	1,33	1,36	1,19	1,17
69	1,42	1,40	1,40	1,36	1,34	1,38	1,43	1,46
70	1,32	1,31	1,36	1,35	1,36	1,36	1,40	1,32
71	1,33	1,32	1,33	1,34	1,36	1,31	1,33	1,31
72	1,41	1,37	1,37	1,37	1,45	1,40	1,47	1,42
73	1,30	1,38	1,33	1,33	1,28	1,20	1,34	1,43
74	1,16	1,18	1,14	1,16	1,20	1,16	1,16	1,17
75	1,24	1,24	1,23	1,22	1,29	1,22	1,25	1,28
76	1,34	1,38	1,36	1,31	1,36	1,31	1,33	1,36
77	1,20	1,22	1,29	1,29	1,27	1,29	1,25	1,21

Lista de Velocidade

Tempo h.	Velocidade Média	
	1	2
1	1,47	1,47
2	0,00	0,00
3	1,47	1,47
4	0,00	0,00
5	0,00	0,00
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
11	0,00	0,00
12	0,00	0,00
13	0,00	0,00
14	0,00	0,00
15	0,00	0,00
16	0,00	0,00
17	0,00	0,00
18	0,00	0,00
19	0,00	0,00
20	0,00	0,00
21	0,00	0,00
22	0,00	0,00
23	0,00	0,00
24	0,00	0,00
25	0,00	0,00
26	0,00	0,00
27	0,00	0,00
28	0,00	0,00
29	0,00	0,00
30	0,00	0,00

APÊNDICE C

VELOCIDADE MÉDIA DO VENTO, EM INTERVALOS DE 10 MINUTOS

1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00

Variação da Velocidade do Vento Durante os Testes

Teste N.º	Velocidade Média (m/s) do Vento, em Intervalos de 10 Minutos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,47	1,43	1,52	2,04	2,07	2,46	1,45	1,92	2,72
2	0,00	0,02	0,10	0,05	0,01	0,01	0,55	-	-
3	1,60	1,15	0,98	1,41	2,57	1,51	1,19	1,27	-
4	0,88	0,64	0,20	0,00	0,00	-	-	-	-
5	2,06	2,17	2,09	2,67	2,64	2,60	2,99	-	-
6	2,77	1,56	2,67	1,58	1,93	0,74	-	-	-
7	1,60	2,08	1,73	2,24	1,38	2,44	-	-	-
8	0,00	0,10	0,11	0,36	0,33	0,22	-	-	-
9	2,91	3,13	3,78	3,87	4,00	3,14	-	-	-
10	2,42	2,84	3,33	3,48	2,23	2,21	-	-	-
11	1,86	1,52	2,34	2,31	3,71	0,70	-	-	-
12	0,03	1,64	2,75	3,10	4,58	3,39	-	-	-
13	4,41	3,02	4,37	4,91	3,53	4,93	-	-	-
14	2,15	1,68	2,42	2,19	2,53	2,15	-	-	-
15	0,46	0,43	0,50	0,38	0,27	0,19	-	-	-
16	3,57	3,78	2,52	3,03	2,79	2,93	-	-	-
17	4,11	2,42	2,36	3,45	1,83	3,05	-	-	-
18	1,88	1,59	2,83	4,18	1,17	0,71	-	-	-
19	0,42	0,00	0,01	0,15	0,14	-	-	-	-
20	2,43	1,96	3,94	3,03	3,41	4,38	-	-	-
21	2,59	1,99	2,09	3,37	2,76	3,01	-	-	-
22	1,57	2,62	2,01	3,10	2,08	1,96	-	-	-
23	0,15	0,52	0,47	0,55	0,00	0,20	-	-	-
24	1,57	1,83	1,68	2,28	1,52	1,41	-	-	-
25	2,06	2,53	2,52	2,67	2,81	2,61	-	-	-
26	1,44	1,34	2,02	1,21	1,32	-	-	-	-

Continua ...

Continuação ...

Teste N.º	Velocidade Média (m/s) do Vento, em Intervalos de 10 Minutos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
27	3,04	1,59	1,94	1,72	1,68	-	-	-	-
28	0,21	0,08	0,38	0,43	0,04	-	-	-	-
29	0,63	0,31	0,65	0,00	-	-	-	-	-
30	2,23	2,23	1,00	1,22	2,43	-	-	-	-
31	0,11	0,43	0,00	0,00	0,00	-	-	-	-
32	0,31	0,95	0,48	0,27	0,68	0,34	-	-	-
33	1,58	2,38	1,95	1,80	0,71	1,86	-	-	-
34	2,14	1,78	1,76	1,59	1,05	-	-	-	-
35	1,06	1,43	1,90	2,86	2,62	-	-	-	-
36	2,46	4,56	3,36	3,38	3,99	3,24	-	-	-
37	2,97	2,18	3,47	2,66	2,39	3,78	-	-	-
38	1,19	1,94	0,85	1,57	1,57	-	-	-	-
39	2,12	1,93	2,21	1,94	2,45	2,76	-	-	-
40	1,54	2,13	1,08	1,14	1,56	0,98	-	-	-
41	0,53	0,40	0,68	0,73	0,75	0,52	-	-	-
42	0,22	0,60	0,88	0,76	0,43	0,84	-	-	-
43	1,95	2,05	0,29	1,38	1,34	1,48	-	-	-
44	0,43	0,04	0,09	0,53	1,12	1,57	-	-	-
45	3,07	2,85	2,93	3,75	3,46	-	-	-	-
46	1,76	2,27	2,55	2,63	2,06	1,12	-	-	-
47	2,15	2,60	3,12	3,29	3,32	3,35	-	-	-
48	1,42	1,50	1,08	1,50	1,06	1,21	-	-	-
49	2,42	1,97	0,84	0,98	1,20	-	-	-	-
50	2,21	2,56	2,71	2,80	2,61	2,15	-	-	-
51	0,34	0,05	1,76	2,52	2,26	-	-	-	-
52	2,37	2,78	2,84	2,03	3,74	4,27	-	-	-

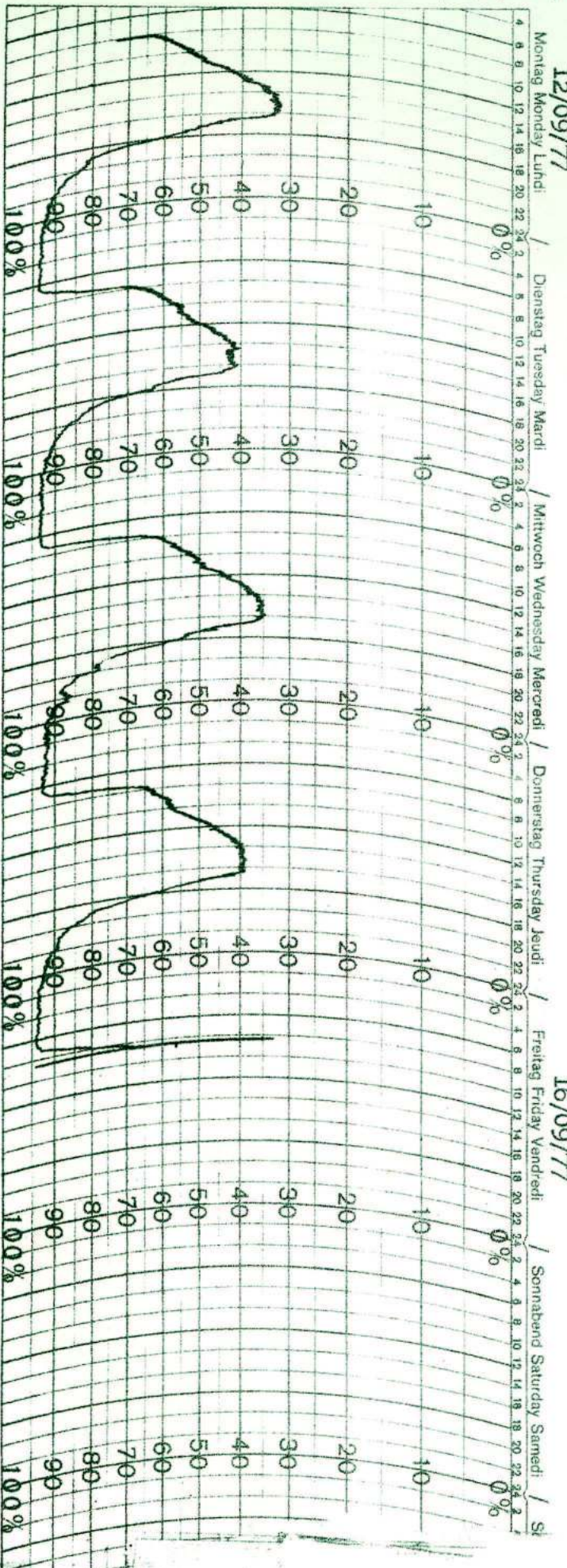
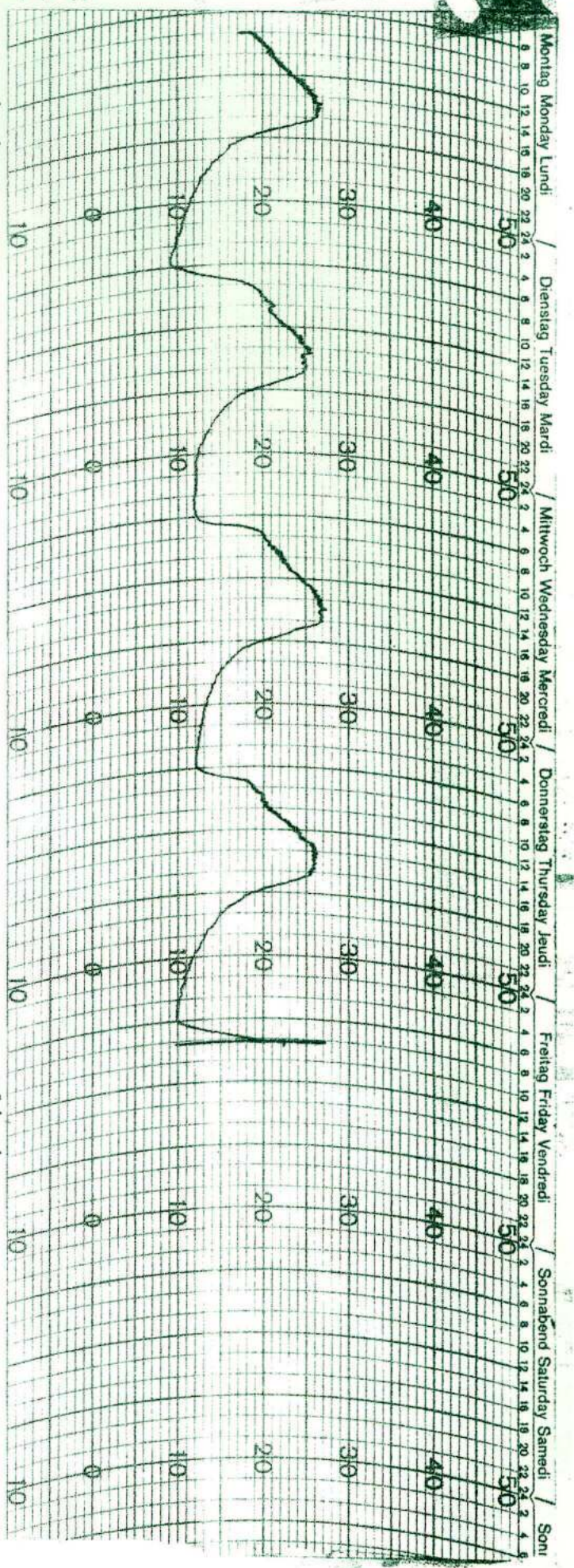
Continua ...

Continuação ...

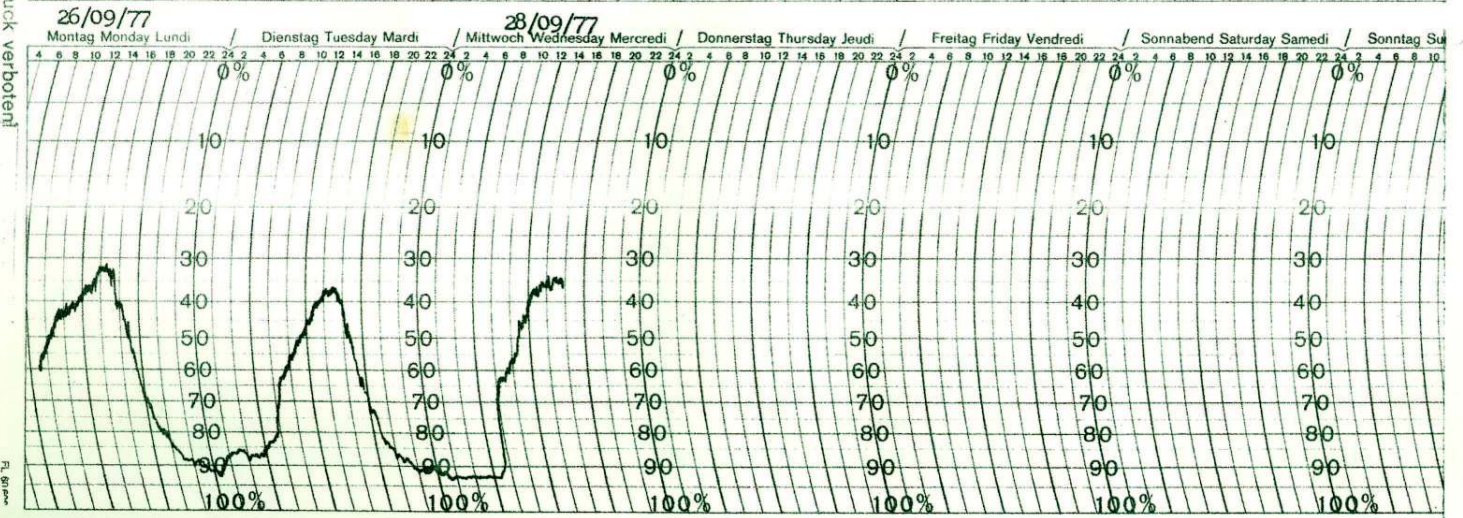
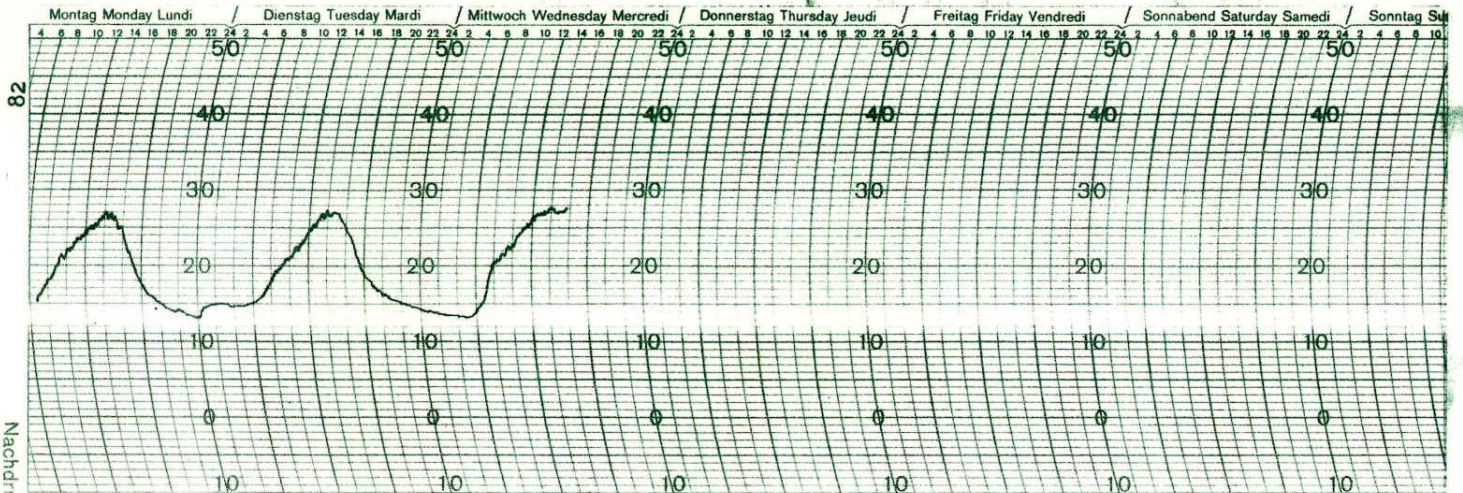
Teste N.º	Velocidade Média (m/s) do Vento, em Intervalos de 10 Minutos								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
53	0,63	1,60	1,60	0,84	2,31	2,46	-	-	-
54	1,95	2,45	1,89	2,35	1,48	0,49	-	-	-
55	0,16	0,35	0,82	1,81	2,99	2,67	-	-	-
56	4,71	3,57	3,12	1,88	2,64	-	-	-	-
57	1,14	1,29	1,09	0,68	1,18	2,62	-	-	-
58	0,72	1,94	1,64	0,52	0,18	0,64	-	-	-
59	0,38	0,56	0,61	0,46	0,27	0,39	-	-	-
60	2,22	0,70	1,32	2,15	0,90	1,65	-	-	-
61	0,77	0,63	0,84	1,66	0,87	0,62	-	-	-
62	2,64	2,11	1,17	1,79	1,22	1,48	-	-	-
63	1,38	0,84	0,59	0,96	0,67	0,71	-	-	-
64	1,73	1,04	1,77	0,78	2,10	1,38	-	-	-
65	2,60	2,62	2,14	1,98	1,64	1,08	-	-	-
66	0,94	0,96	2,01	1,52	0,83	0,79	-	-	-
67	1,50	0,46	0,78	0,83	0,49	-	-	-	-
68	1,64	2,38	3,43	3,17	3,67	3,06	-	-	-
69	3,52	4,53	4,37	4,26	3,91	3,33	-	-	-
70	1,64	1,22	2,20	2,48	2,72	1,34	-	-	-
71	0,46	0,15	0,24	0,76	0,25	0,26	-	-	-
72	2,03	2,45	2,39	2,03	2,60	2,07	-	-	-
73	3,26	3,02	3,77	3,46	2,57	2,20	-	-	-
74	2,01	1,41	2,47	1,31	1,69	1,32	-	-	-
75	0,39	0,57	0,26	0,65	0,93	-	-	-	-
76	2,36	2,61	2,77	3,23	2,24	2,86	-	-	-
77	1,65	0,95	1,78	1,56	0,88	0,74	-	-	-

APÊNDICE D

TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

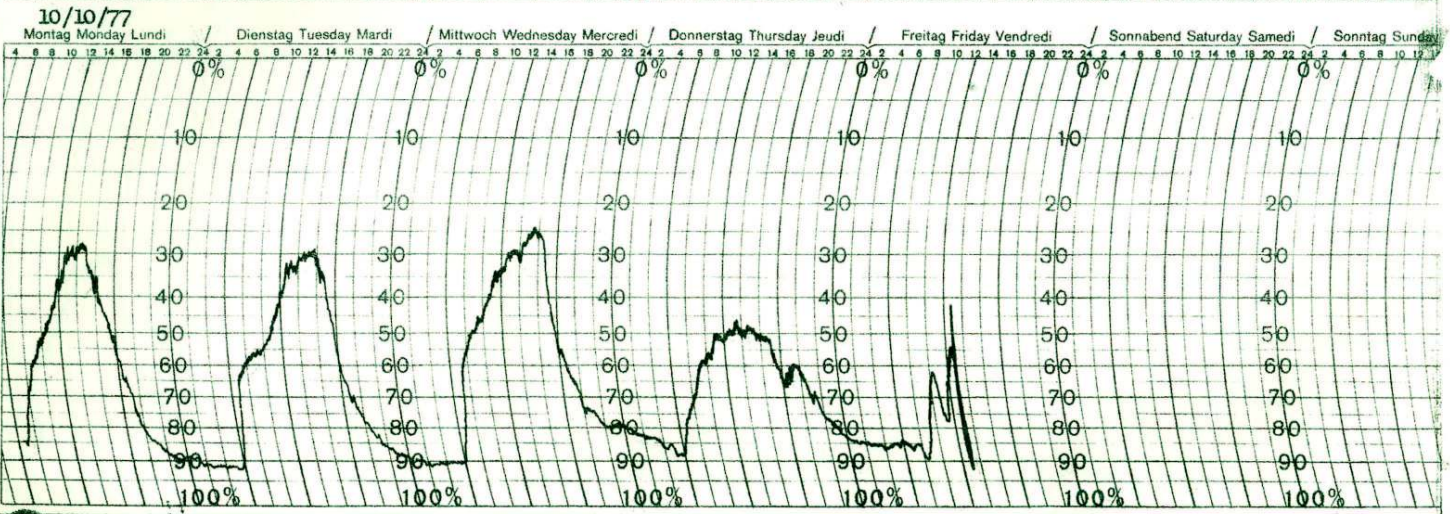
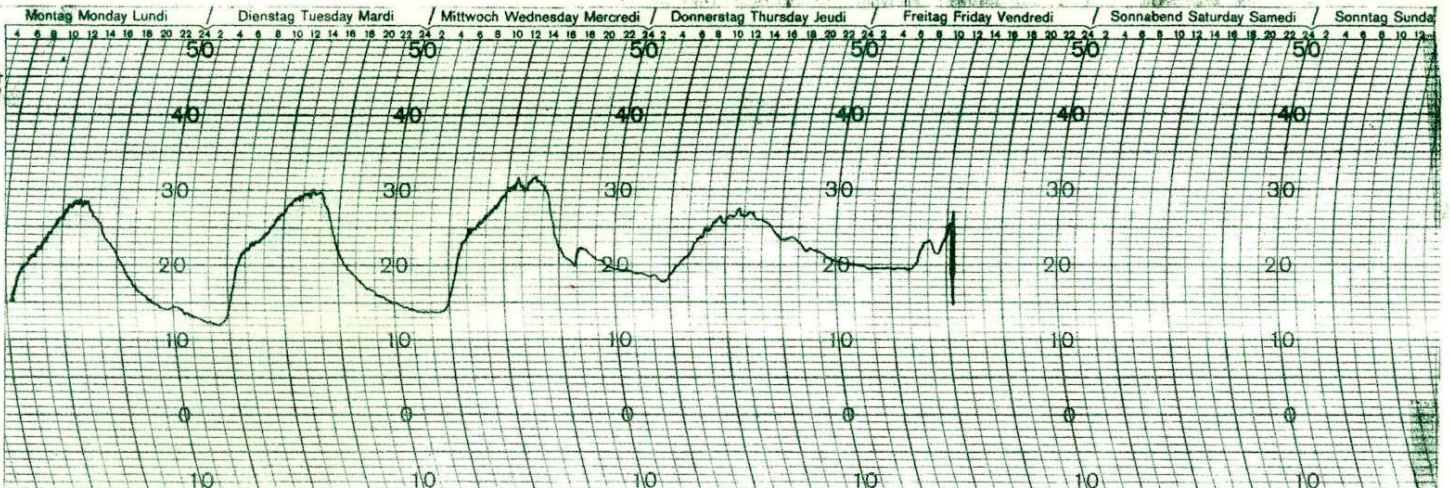


Nachdruck verboten



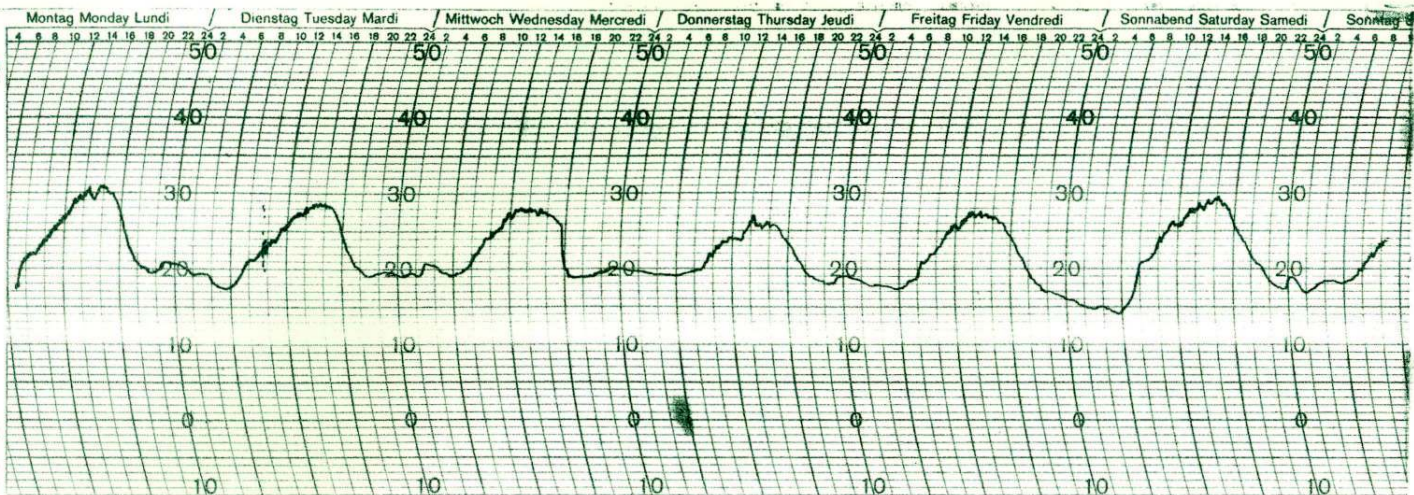
Nachdruck verboten!

Fl. 8/10/77

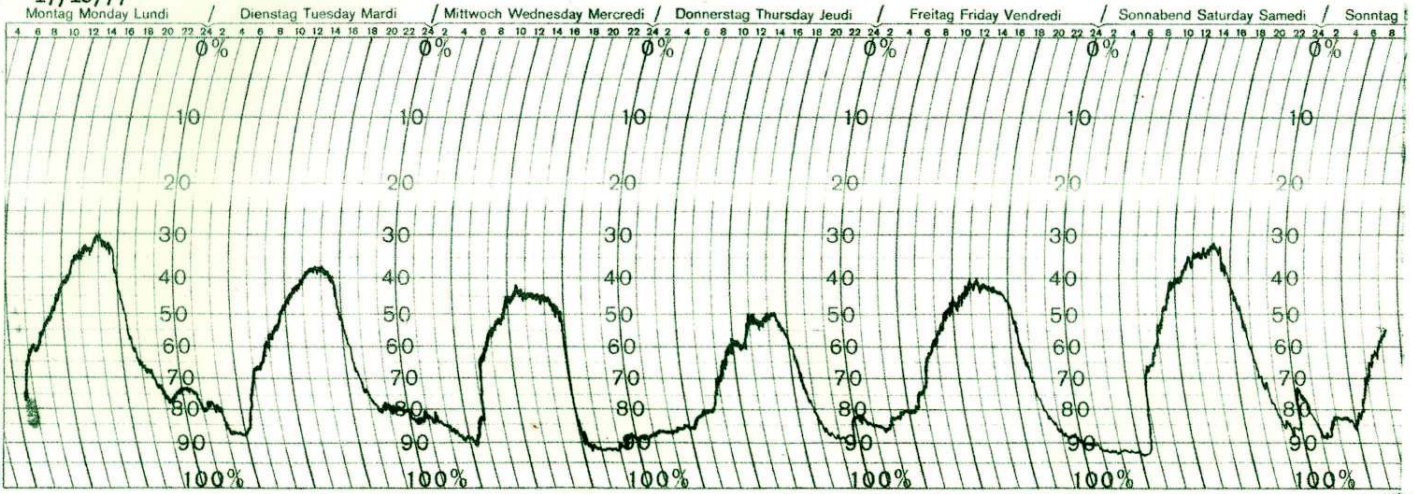


Nachtdruck verboten

F. 2008



17/10/77



APÊNDICE E

FICHA UTILIZADA PARA ANOTAÇÕES DOS DADOS

